

Multisensorische Integration von redundanten Reizen

Dissertation zur Erlangung des
Doktorgrades der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)

dem Fachbereich Psychologie der Philipps-Universität
Marburg vorgelegt von Matthias Gondan aus Freiburg

Marburg/Lahn, 2005

Multisensorische Integration von redundanten Reizen

Vom Fachbereich Psychologie der Philipps-Universität Marburg
am angenommen.

Erstgutachter: Prof. Dr. Brigitte Röder

Zweitgutachter: Prof. Dr. Frank Rösler

Tag der mündlichen Prüfung:

Inhalt

Zusammenfassung	1
Einleitung	3
0.1 Intersensorische Erleichterungseffekte	5
0.2 Race Model und Coactivation Model	7
0.3 Redundanzgewinne bei unimodalen und bimodalen Reizen	10
0.4 Superpositionsmodell der Koaktivierung	14
0.5 Energy summation und preparation enhancement	15
0.6 Zelluläre Mechanismen	17
0.7 Überblick über die Teilstudien	19
1 Trisensorische Interaktionen	21
1.1 Hintergrund	21
1.2 Methode	25
1.3 Ergebnisse	28
1.4 Diskussion	33
2 Modalitätswechselkosten	35
2.1 Hintergrund	35
2.2 Methode	39
2.3 Ergebnisse	41
2.4 Diskussion	44

3	Multisensorische Interaktionen in ereigniskorrelierten Potentialen	49
3.1	Hintergrund	49
3.2	Methode	55
3.3	Ergebnisse	57
3.4	Diskussion	62
4	Räumliche Beziehung der Reizkomponenten	67
4.1	Hintergrund	67
4.2	Methode	75
4.3	Ergebnisse	81
4.4	Diskussion	90
5	Räumliche Aufmerksamkeit	97
5.1	Hintergrund	97
5.2	Experiment 1 – Methode	102
5.3	Experiment 1 – Ergebnisse	103
5.4	Experiment 1 – Diskussion	106
5.5	Experiment 2 – Methode	108
5.6	Experiment 2 – Ergebnisse	109
5.7	Diskussion	112
6	Allgemeine Diskussion	117
6.1	Diskussion der Teilstudien	118
6.2	Schlussfolgerungen	127
6.3	Kortikale Mechanismen	132
6.4	Offene Fragen und Ausblick	136
	Literatur	143
	Autorenverzeichnis	159

Sachverzeichnis	165
Danksagung	169
Erklärung	171

Zusammenfassung

Wenn eine Versuchsperson die Aufgabe hat, in der gleichen Weise auf Reize zweier Modalitäten (z. B. ein Licht- und ein Tonsignal) zu reagieren, beobachtet man deutlich schnellere Reaktionen, wenn die beiden Reize gleichzeitig dargeboten werden, als wenn nur einer der beiden Reize dargeboten wird. Dieser Effekt wird als Redundanzeffekt (*redundant target effect*) bezeichnet. Die schnelleren Reaktionen auf die redundanten Reize sind ein Hinweis darauf, dass die Informationen aus den Sinnesystemen in irgendeiner Weise integriert werden. Auf welche Weise diese Integration stattfindet und wovon sie abhängig ist, wurde in der vorliegenden Arbeit in fünf Teilstudien untersucht, wobei die Anzahl der redundanten Reize, Reihenfolgeeffekte, die räumliche Beziehung der Reizkomponenten und die räumliche Aufmerksamkeit betrachtet wurden. Neben Reaktionszeiten wurden in zwei Teilstudien (Kap. 3 & 4) auch ereigniskorrelierte Potentiale gemessen, um Hinweise auf diejenigen Hirnregionen zu gewinnen, die in spezifischer Weise auf multimodale Reize antworten.

In Kapitel 1 wird gezeigt, wie spezifische Redundanzgewinne bei dreifach redundanten Reizen (Ton, Licht und Tastreiz) untersucht werden können. Es wird insbesondere gezeigt, dass die beobachteten Redundanzgewinne bei trimodalen Reizen vollständig durch paarweise bisensorische Redundanzgewinne erklärt werden können.

In Kapitel 2 wird der Einfluss von Modalitätswechselkosten untersucht: In zufälligen Sequenzen von auditiven und visuellen Reizen sind die Reaktionen auf einen Teil der Reize verlangsamt, dann nämlich, wenn sich die Modalität des aktuellen Reizes von der Modalität des Vorgängerreizes unterscheidet. Da bei den redundanten Reizen immer mindestens eine Stimuluskomponente dem Vorgängerreiz entspricht, sind die

redundanten Reize hiervon nicht betroffen. Ein Teil des Redundanzgewinns könnte daher auch auf Modalitätswechselkosten zurückgehen. In Kapitel 2 wird gezeigt, wie man mit diesem Problem umgehen kann und dass Modalitätswechsel zwar einen Redundanzgewinn verursachen können, dass es aber gleichwohl deutliche Hinweise auf multisensorische Integration bei auditiv-visuellen, auditiv-taktilen und visuell-taktilen redundanten Reizen gibt.

In Kapitel 3 wird eine Methode vorgestellt, mit der Wechselwirkungen des Seh- und Hörsystems mit ereigniskorrelierten Potentialen (EKPs) untersucht werden können. In bisherigen Untersuchungen wurde hierfür häufig das EKP auf einen auditiv-visuellen Reiz (AV) mit der Summe der EKPs auf einen auditiven und einen visuellen Reiz ($A + V$) verglichen. Ein Problem dieser Vergleichsmethode ist, dass AV, A und V keinerlei gemeinsame Aktivität enthalten dürfen. In Kapitel 3 wird eine Alternativmethode vorgestellt, die robust gegenüber gemeinsamer Aktivität ist.

In Kapitel 4 wird untersucht, inwieweit die räumliche Beziehung der beiden Komponenten eines redundanten Reizes die multisensorische Integration und den Redundanzgewinn beeinflusst. Es zeigt sich, dass redundante Reize, die am gleichen Ort präsentiert werden, effizienter verarbeitet werden als redundante Reize, die an unterschiedlichen Orten präsentiert werden. Die räumliche Beziehung der Reize wirkt sich auch auf die kortikale Verarbeitung aus: Bei Reizen, die am gleichen Ort präsentiert wurden, konnte eine EEG-Veränderung an parietalen Elektroden beobachtet werden, was auf eine spezifische Beteiligung polymodaler Hirnareale im Parietallappen an der multisensorischen Integration hinweist.

In Kapitel 5 wird gezeigt, dass der Redundanzgewinn in hohem Maße davon abhängig ist, ob sich die Versuchsperson auf den Ort der Reizpräsentation konzentriert. Dies ist ein Hinweis darauf, dass die multisensorische Integration von redundanten Reizen weniger ein reizgesteuerter *bottom up*-Prozess ist, sondern eher auf der Ebene von Reiz-Reaktions-Assoziationen stattfindet, wie es in neueren Modellen der Verarbeitung von visuellen Informationen vorgeschlagen wird.

Einleitung

Wahrnehmung im Alltag betrifft selten ein Sinnessystem alleine. Meist sind mehrere Sinne gleichzeitig aktiv und liefern ergänzende, redundante und (selten) widersprüchliche Informationen, aus denen dann eine einheitliche Repräsentation der Umwelt konstruiert wird. Die Informationen aus den verschiedenen Sinnessystemen müssen hierfür integriert und in einen gemeinsamen Code übersetzt werden, der am Ende neben sinnesspezifischen Merkmalen wie Lautstärke, Tonhöhe, Helligkeit und Kontrast auch supramodale bzw. modalitätsübergreifende Merkmale wie Anzahl, Dauer und Bedeutung beschreibt (Calvert, Spence & Stein, 2004).

In der vorliegenden Arbeit wird ein spezifischer Aspekt dieser Integration untersucht: die Verarbeitung redundanter auditiver und visueller Informationen bei einfachen Reaktionsaufgaben. In einer typischen Aufgabe dieser Art werden der Versuchsperson drei Arten von Stimuli dargeboten: ein auditiver Reiz (A), z. B. ein Ton aus einem Lautsprecher; ein visueller Reiz (V), z. B. eine auf den Lautsprecher montierte Lampe, die kurz aufleuchtet; und die Kombination aus beiden, also ein auditiv-visueller bzw. bimodaler Reiz (AV). Auf alle drei Stimuli soll die Versuchsperson in der gleichen Weise reagieren, z. B. mit einem Tastendruck. Da auf A und V die gleiche Reaktion ausgeführt werden soll, A und V demnach die gleiche „Bedeutung“ für die Versuchsperson haben, wird AV auch als redundanter Reiz bezeichnet. Es zeigt sich, dass die Reaktionen auf die redundanten Reize i. d. R. wesentlich schneller sind als die Reaktionen auf die unimodalen Reize. Dieser Effekt wird auch als Redundanzeffekt (*redundancy gain*, *redundant signals effect*, *redundant target effect*, z. B. Miller, 1982) bezeichnet. Die schnelleren Reaktionen auf die redundanten Reize weisen darauf hin, dass die In-

formationen aus den beiden Sinnessystemen in irgendeiner Weise integriert werden. Auf welche Weise diese Integration stattfindet, wurde in der vorliegenden Arbeit in fünf Teilstudien untersucht. Dabei wurden folgende Aspekte genauer betrachtet: die Anzahl der redundanten Reize (Kapitel 1), Reihenfolgeeffekte (Kapitel 2), das EEG (Kapitel 3), die räumliche Beziehung der beiden Reize (Kapitel 4) und die Fokussierung der räumlichen Aufmerksamkeit (Kapitel 5).

Multisensorische Integrationsprozesse können in zwei Klassen eingeteilt werden (Loveless, Brebner & Hamilton, 1970): (a) Ein Sinnessystem beeinflusst das andere; (b) die Sinnessysteme kooperieren. Zu (a) zählen z. B. der Bauchrednereffekt (Howard & Templeton, 1966), Illusionen (Shams, Kamitani & Shimojo, 2000) und crossmodale Aufmerksamkeitseffekte (Driver & Spence, 1998; Eimer, 1999; Hillyard, Simpson, Woods, van Voorhis & Münte, 1984). Zu (b) zählen z. B. Vorgänge bei der multisensorischen Objekterkennung (Calvert, Brammer & Iversen, 1998) und die Interaktion von Sehen und Hören beim Sprachverstehen (Sumby & Pollack, 1954). Die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Redundanzeffekte fallen ebenfalls in Kategorie (b).

Eine ähnliche Einteilung wurde von Welch und Warren (1986) vorgeschlagen. Sie unterscheiden drei Mechanismen der multisensorischen Integration: unspezifische akzessorische Effekte, Kontexteffekte und spezifische multisensorische Interaktionen. Unter die unspezifischen akzessorischen Effekte fällt z. B. die Beobachtung, dass ein auditiver Warnreiz die Verarbeitung eines später präsentierten visuellen Reizes erleichtert. „Unspezifisch“ bedeutet demnach, dass die Sinnessysteme keinerlei Informationen austauschen: Das Warnsignal erhöht lediglich Vigilanz und Reaktionsbereitschaft der Person (z. B. Lovelace, Stein & Wallace, 2003; McDonald, Teder-Sälejärvi & Hillyard, 2000). Obwohl unspezifisch, wird dieser Mechanismus gleichwohl von vielen Faktoren beeinflusst, so z. B. von der Intensität des Warnreizes, von der Intensität des Zielreizes, vom Intervall zwischen den Reizen usw. (vgl. Welch & Warren, 1986). Die Kontexteffekte entsprechen den bereits genannten Täuschungen/Illusionen, hier wirkt sich die Darbietung eines Reizes in der einen Modalität auf die Verarbeitung der Informationen in einer anderen Modalität aus. Bietet man z. B. einen Lichtreiz zusammen mit

zwei Tonreizen dar, berichten Versuchspersonen häufig, zwei Lichtreize gesehen zu haben (Shams et al., 2000). Unter spezifischen multisensorischen Effekten verstehen Welch und Warren, dass die Sinnessysteme in irgendeiner Form Informationen austauschen und sich gegenseitig ergänzen. Dies geschieht z. B. unter schlechten Wahrnehmungsbedingungen: Hört man einer Person zu und sieht gleichzeitig ihre Lippenbewegung, versteht man sie besser (Sumbly & Pollack, 1954).

0.1 Intersensorische Erleichterungseffekte

Diejenigen Untersuchungen zur multisensorischen Integration, die für die Fragestellung der vorliegenden Arbeit relevant sind, können grob in zwei Kategorien unterteilt werden: In die erste Kategorie fallen Untersuchungen, bei denen die Verarbeitung eines Reizes in einer bestimmten Sinnesmodalität untersucht wurde, wobei zusätzlich irrelevante Reize in einer anderen Sinnesmodalität dargeboten wurden. In die zweite Kategorie fallen die eigentlichen Redundanzexperimente, bei denen die Versuchsperson auf zwei Arten von Stimuli in der gleichen Weise reagieren soll und die Stimuli einzeln oder kombiniert dargeboten wurden. Eine typische Untersuchung der ersten Kategorie wurde von Bernstein und Edelstein (1971) durchgeführt. Hier hatten die Versuchspersonen die Aufgabe, Wahlreaktionen auf visuelle Reize hin auszuführen: Wurde der Reiz auf der linken Seite dargeboten, sollten die Versuchspersonen mit der linken Hand reagieren, wurde der Reiz auf der rechten Seite dargeboten, sollten sie mit rechts reagieren. Gleichzeitig wurde in manchen Durchgängen ein auditiver Reiz dargeboten, den die Versuchspersonen nicht beachten sollten. Bernstein und Edelstein beobachteten, dass der zusätzliche auditive Reiz bereits zu schnelleren Reaktionen führte. Er bewirkte also einen unspezifischen Erleichterungseffekt: Der visuelle Stimulus wurde durch den zusätzlichen auditiven Reiz schneller verarbeitet, obwohl die Versuchspersonen auf alleine dargebotene auditive Reize gar nicht reagieren durften (vgl. auch Bernstein, Clark & Edelstein, 1969; Simon & Craft, 1970).

Dieser unspezifische Erleichterungseffekt wird von Bernstein (1970) im Rahmen

eines *preparatory state model* erklärt und von Nickerson (1973) als *preparation enhancement* bezeichnet. Der Mechanismus, der diesem unspezifischen Effekt zugrunde liegt, scheint relativ global zu wirken: Schmidt, Gielen und van der Heuvel (1984) beobachteten z. B., dass der Gewinn durch einen auditiven Warnreiz konstant war, und zwar unabhängig von der Intensität des visuellen Zielreizes, unabhängig von der Komplexität der geforderten Reaktion und ebenfalls unabhängig von der Reaktionskompatibilität des visuellen Zielreizes. Der auditive Warnreiz scheint also weder die Wahrnehmung des visuellen Reizes noch die Antwortselektion zu beeinflussen.

Zusätzlich beobachteten Bernstein und Edelstein (1971) einen weiteren *spezifischen* Effekt: Wenn der auditive Warnreiz auf der gleichen Seite wie der visuelle Zielreiz dargeboten wurde, waren die Reaktionen schneller, als wenn der Warnreiz auf der gegenüberliegenden Seite dargeboten wurde. Frassinetti, Bolognini und Ládavas (2002) berichten ähnliche Effekte bei der Entdeckung von schwachen visuellen Reizen. Der „unspezifische“ Mechanismus scheint also zumindest teilweise auch räumlich spezifisch zu wirken.

Die zweite Kategorie bilden die eigentlichen Redundanzexperimente: Hier hat die Versuchsperson die Aufgabe, auf alle Stimuli in der gleichen Weise zu reagieren. Einige dieser Untersuchungen werden im Folgenden vorgestellt, zuvor muss jedoch ein Mechanismus beschrieben werden, der streng genommen gar nicht als multisensorische Integration bezeichnet werden kann: *statistical facilitation* (Raab, 1962). Dieser Mechanismus kann am besten anhand einer Würfelanalogie veranschaulicht werden: Die Chance, eine sechs zu würfeln, beträgt $1/6$, wenn man einmal würfelt. Entsprechend sei die Wahrscheinlichkeit bei einer fiktiven Versuchsperson $1/6$, dass sie weniger als 200 ms für die Reaktion auf einen einfachen auditiven oder visuellen Reiz benötigt. Würfelt man nun mit zwei Würfeln und wählt den Würfel mit der höheren Augenzahl, liegt die Chance auf eine sechs in etwa doppelt so hoch, genauer: $2/6 - (1/6 \cdot 1/6)$. Wird der Versuchsperson ein redundanter Reiz dargeboten, wird angenommen, dass die beiden Teilstimuli jeweils voneinander unabhängige Verarbeitungsprozesse auslösen und dass der Reiz, der schneller verarbeitet wird, am Ende die Reaktion auslöst. Die Wahr-

scheinlichkeit, dass die Reaktion auf einen gegebenen redundanten Reiz schneller als 200 ms ist, läge dann analog ebenfalls bei $2/6 - (1/6 \cdot 1/6)$. Auf redundante Reize ist also auch dann ein höherer Anteil schnellerer Reaktionen und damit schnellere mittlere Reaktionszeiten zu erwarten, wenn die Informationen aus den beiden Sinnessystemen völlig unabhängig voneinander verarbeitet werden. Will man multisensorische Interaktionen nachweisen, muss man sich daher gegen *statistical facilitation* absichern.

0.2 Race Model und Coactivation Model

Ein einfacher Vergleich der mittleren Reaktionszeiten von einfachen und redundanten Reizen reicht also nicht aus, um multisensorische Integration bei der Verarbeitung von auditiv-visuellen Reizen nachzuweisen: Denn selbst wenn die Verarbeitungswege für den auditiven und den visuellen Teilstimulus komplett unabhängig voneinander wären, würde man aufgrund von *statistical facilitation* trotzdem schnellere Reaktionen auf redundante Reize als auf unimodale Reize beobachten (Raab, 1962). Das entsprechende Verarbeitungsmodell, in dem die Reize unabhängig voneinander verarbeitet werden und quasi „um die Wette“ rennen, wurde von Miller (1982) als *race model* bezeichnet. Eine Integration der Informationen aus den beiden Sinnessystemen findet, wie bereits erwähnt, in diesem Modell nicht statt.

Der Reaktionszeitgewinn, der durch *statistical facilitation* ermöglicht wird, hat eine obere Grenze, die entweder durch Simulation (Klein, 1977) oder einfacher durch die *race model inequality* (Miller, 1982) festgelegt werden kann:

$$p(RT_{AV} < t_0) \leq p(RT_A < t_0) + p(RT_V < t_0) \quad (0.1)$$

Gleichung 0.1 besagt: Die Wahrscheinlichkeit, dass eine Reaktion auf einen redundanten Reiz RT_{AV} innerhalb von z. B. $t_0 = 200$ ms erfolgt, ist kleiner oder gleich der Wahrscheinlichkeit, dass eine Reaktion auf einen auditiven Reiz innerhalb von 200 ms erfolgt, plus der Wahrscheinlichkeit, dass eine Reaktion auf einen visuellen

Reiz innerhalb von 200 ms erfolgt. Sind die Verarbeitungszeiten für die beiden Stimuli unkorreliert, wie beim Würfeln, gilt das *independent race model*:

$$p(RT_{AV} < t_0) = p(RT_A < t_0) + p(RT_V < t_0) - p(RT_A < t_0) \cdot p(RT_V < t_0) \quad (0.2)$$

In Reaktionszeitexperimenten ist diese Annahme problematisch, denn Müdigkeit, Motivation usw. beeinflussen die Verarbeitungszeiten der beiden Reize gleichermaßen, weswegen man nicht annehmen kann, dass RT_A und RT_V im bimodalen Reiz voneinander unabhängig sind. Deshalb wird i. d. R. Gleichung 0.1 verwendet, die die obere Schranke für den Reaktionszeitgewinn durch *statistical facilitation* angibt. Gleichung 0.1 kann nur in den unteren Prozenträngen der Reaktionszeitverteilung angewendet werden, weil die rechte Seite von Gleichung 0.1 bei $p = 2$ endet (z. B. ist $p(RT_A < 10 \text{ s}) \approx 1$ und $p(RT_V < 10 \text{ s}) \approx 1$). Um Gleichung 0.1 anzuwenden, werden zunächst die kumulierten Häufigkeitsverteilungen (CDFs) der Reaktionszeiten auf die unimodalen Reize (A und V) gebildet. Die CDF gibt an, welcher Anteil der Reaktionen schneller als eine gegebene Reaktionszeit ist, z. B. $t_0 = 200 \text{ ms}$, also $p(RT < 200 \text{ ms})$. Dann werden die CDFs zu A und V aufsummiert (vgl. rechte Seite von Gl. 0.1) und mit der CDF der Reaktionszeiten auf den redundanten Reiz $p(RT_{AV} < 200 \text{ ms})$ verglichen, der linken Seite von Gleichung 0.1. Das *race model* gilt, wenn die CDF der Reaktionszeiten auf bimodale Reize $p(RT_{AV} < t_0)$ für alle t_0 kleiner als die Summe der CDFs der Reaktionszeiten auf die beiden unimodalen Reize $p(RT_A < t_0) + p(RT_V < t_0)$ ist. Dies ist in Abbildung 0.1a graphisch veranschaulicht.

Verletzungen des *race model* können auf Signifikanz überprüft werden, indem für jede Versuchsperson kumulierte Häufigkeitsverteilungen für RT_A , RT_V und RT_{AV} gebildet werden. Hierfür werden die Daten zunächst diskreten Kategorien (*bins*) zugeordnet. Die Kategoriengrenzen werden z. B. an jedem 5. Perzentil der Gesamtverteilung definiert. Jedem *bin* wird dann die Anzahl der Reaktionszeiten zugeordnet, die innerhalb der Kategoriengrenzen liegen, plus alle langsameren Reaktionen, da ja die kumulierte Häufigkeitsverteilung gebildet wird. An jedem dieser *bins* kann dann ein Vorzeichentest für die Differenz $bin_{AV} - (bin_A + bin_V)$ gerechnet werden (Corballis,

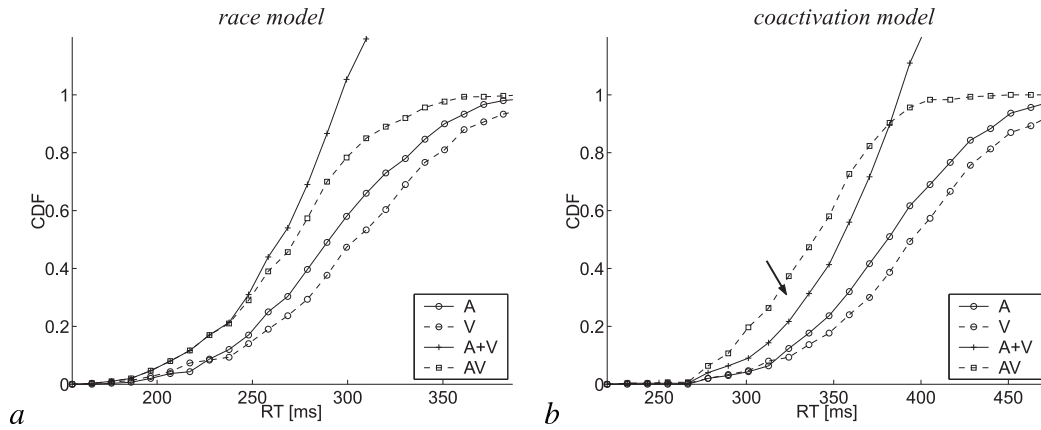


Abbildung 0.1: Simulierte kumulierte Reaktionszeitverteilungen (CDFs) für auditive (A), visuelle (V) und bimodale (AV) Stimuli. Die mit Pluszeichen markierte Kurve ist die Summe der unimodalen Reaktionszeitverteilungen, $p(RT_A < t_0) + p(RT_V < t_0)$. Die Summenkurve endet bei 2.0, der *race model*-Test ist deswegen nur in den unteren Prozenträngen anwendbar. Der CDF der bimodalen Reaktionszeiten im linken Bild (a) liegt ein *race model* zugrunde, sie liegt deswegen unter der Summenkurve. Im rechten Bild (b) wurde Koaktivierung angenommen, die CDF der bimodalen Reize liegt daher teilweise oberhalb der Summenkurve (mit Pfeilchen markiert).

2002). Nach dem *race model* muss bin_{AV} überall unterhalb der Schranke liegen, die durch $(bin_A + bin_V)$ definiert wird (Abb. 0.1a).

Liegt der Anteil der schnellen Reaktionen auf bimodale Stimuli oberhalb dieser Schranke (Abb. 0.1b), muss ein *coactivation model* angenommen werden (Miller, 1982): Das *coactivation model* geht von einer Station der kognitiven Verarbeitung aus, an der die Informationen aus den beiden Sinneskanälen A und V integriert werden. Diese Station profitiert von der redundanten Information, wodurch schließlich schnellere Reaktionen ausgelöst werden.

0.3 Redundanzgewinne bei unimodalen und bimodalen Reizen

In Experimenten mit rein unimodalen redundanten Reizen (z. B. Einfachreaktionen auf visuelle Reize von links und rechts) beobachtet man bei Normalpersonen i. d. R. keine Verletzungen des *race model* (Corballis, 2002; Forster, Cavina-Pratesi, Aglioti & Berlucchi, 2002; Mordkoff, Miller & Roch, 1996; Murray, Foxe, Higgins, Javitt & Schroeder, 2001), d. h. die redundanten Informationen werden innerhalb eines Sinnesystems parallel verarbeitet (vgl. hierzu auch Kap. 5). In drei Ausnahmefällen wurde allerdings auch bei rein visuellen Aufgaben Koaktivierung beobachtet (Miniussi, Girrelli & Marzi, 1998; Miller, 1982; Mordkoff & Yantis, 1991). Bei Miniussi et al. hatten die Versuchspersonen die Aufgabe, auf visuelle Reize zu reagieren, die links oder rechts im unteren Gesichtsfeld erschienen. Wurden beide Reize gleichzeitig dargeboten (redundanter Reiz), waren die Reaktionen schneller, und es wurde eine geringfügige Verletzung des *race model* beobachtet. Die Autoren führten allerdings keinen Signifikanztest durch. Der ohnehin sehr geringe Effekt in dieser Studie könnte daher auch auf Zufallsschwankungen zurückgehen. Miller (1982, Exp. 3) berichtet ebenfalls Koaktivierung bei einer Suchaufgabe, bei der Buchstaben detektiert werden sollten. Hier stellt sich aber das Problem, dass die nicht-redundanten Reize Kombinationen aus einem Zielreiz und einem Reiz waren, auf den nicht reagiert werden sollte. In solchen Fällen ist ein Reaktionskonflikt denkbar, der die Reaktionen auf die nicht-redundanten Reize bremst. Bei den redundanten Reizen tritt kein solcher Reaktionskonflikt auf, da auf beide Teilstimuli in der gleichen Weise reagiert werden soll. Fournier und Eriksen (1990) argumentieren, dass hierdurch ein scheinbarer Koaktivierungseffekt zustande kommen kann. Schließlich beobachteten Mordkoff und Yantis (1991) einen Koaktivierungseffekt bei rein visuellen Reizen, wenn zwischen den Stimuluskomponenten eines redundanten Reizes positive Kontingenzen hergestellt wurden, wenn also ein Reiz den anderen vorhersagt. Interessanterweise wurde bei Split-Brain-Patienten durchaus

Koaktivierung bei rein visuellen redundanten Reizen beobachtet, paradoxerweise genau dann, wenn die Reize in getrennten Gesichtsfeldern dargeboten wurden (Corballis, 1998; Corballis, Hamm, Barnett & Corballis, 2002; Roser & Corballis, 2002; Reuter-Lorenz, Nozawa, Gazzaniga & Hughes, 1995).

In Experimenten mit redundanten Reizen in zwei Sinnesmodalitäten sind die Redundanzgewinne i. d. R. höher als durch *statistical facilitation* vorhergesagt (vgl. z. B. Kap. 1–4; Diederich & Colonius, in press; Miller, 1982, 1986, 1991; Molholm et al., 2002; Murray et al., in press; Schröger & Widmann, 1998). An irgendeiner Station der kognitiven Verarbeitung scheint also ein Redundanzgewinn anzufallen. Es besteht aber wenig Einigkeit, an welcher Station dies stattfinden soll. Überdies können Redundanzgewinne auch an mehreren Stellen gleichzeitig anfallen (Miller, 1982). Hinweise auf Redundanzgewinne an frühen, eher perzeptuellen Verarbeitungsstufen liefern die Untersuchungen von Molholm et al. (2002) und Murray et al. (in press, vgl. folgender Abschnitt). Miller (1982, 1991) geht eher von der Ebene der Antwortselektion aus. Hinweise auf Koaktivierung bei motorischen Verarbeitungsstufen geben Diederich und Colonius (1987) und Giray und Ulrich (1993, vgl. übernächste Seite). Einige dieser Untersuchungen und ihre Bedeutung für die vorliegende Arbeit werden im Folgenden dargestellt.

Molholm et al. (2002) untersuchten Einfachreaktionen auf auditive, visuelle und auditiv-visuelle Reize mit ereigniskorrelierten Potentialen (EKPs). Das Hauptinteresse lag auf dem Zeitpunkt, an dem das auditive und visuelle System interagieren. Hierfür wurden auditiv, visuell und bimodal evozierte Potentiale gemessen (AEP, VEP, AVEP). Die Autoren verglichen dann das bimodal evozierte Potential (AVEP) mit der Summe der unimodal evozierten Potentiale (AEP + VEP). Diesem Vergleich liegt folgende Überlegung zugrunde (Barth, Goldberg, Brett & Di, 1995): Arbeiten die Sinnessysteme unabhängig voneinander, sollte sich AVEP nicht von AEP + VEP unterscheiden, d. h. der Ausdruck $AVEP - (AEP + VEP)$ sollte Null ergeben. Interagieren die Systeme, sollte sich AVEP von AEP + VEP hingegen unterscheiden. Der Zeitpunkt nach Stimulusdarbietung, ab dem sich AVEP vom Summenpotential AEP + VEP unterscheidet, sollte

dann auf die Station der kognitiven Verarbeitung hinweisen, an der der Redundanzgewinn anfällt. In der Untersuchung von Molholm et al. lag dieser Zeitpunkt bereits bei ca. 50 ms nach Präsentation des Stimulus. Die Autoren schlossen aus diesem Befund, dass der Redundanzgewinn auf einer frühen perzeptuellen Stufe anfällt. Murray et al. (in press) fanden zudem keine Evidenz dafür, dass der Beginn dieser multisensorischen Interaktion bei visuell-taktilen Stimuli von der räumlichen Beziehung zwischen den beiden Stimuluskomponenten abhängt. Die Schlussfolgerungen von Molholm et al. und Murray et al. sind allerdings aus zwei Gründen problematisch: Zum einen setzt die Subtraktion zweier EKPs (AEP + VEP) von einem (AVEP) voraus, dass die drei EKPs keinerlei gemeinsame Aktivität (z. B. Motorik, Erwartungen) enthalten, denn diese würde zweimal von AVEP abgezogen und erschiene dann mit negativem Vorzeichen im Ergebnisterm (Teder-Sälejärvi, McDonald, Russo & Hillyard, 2002, eine mögliche Lösung dieses Problems wird in Kap. 3 der vorliegenden Arbeit vorgestellt). Zum anderen ist nicht klar, warum ein EKP-Effekt mit einer bestimmten Latenz bedeuten soll, dass der Redundanzgewinn zum gleichen Zeitpunkt anfällt (Coles, Smid, Scheffers & Otten, 1995). Sowohl bei Molholm et al. als auch bei Murray et al. wurden auch innerhalb anderer Zeitintervalle multisensorische Interaktionen im EKP beobachtet [d. h. $AVEP - (AEP + VEP)$ unterschied sich von Null], auch diese könnten daher Kandidaten für den Koaktivierungseffekt sein. Schließlich sagt der Latenzvergleich für Reize mit unterschiedlicher räumlicher Beziehung (wie bei Murray et al., in press) relativ wenig über den Einfluss der räumlichen Beziehung auf die multisensorische Integration aus, ein direkter Vergleich der EKPs erscheint angemessener (vgl. Kap. 4).

Ein wichtiges Prinzip der multisensorischen Integration ist die zeitliche und räumliche Koinzidenz der Reize: Nur Stimuli, die am gleichen Ort präsentiert werden, werden dem selben Objekt zugeordnet (Attneave, 1974). Der Einfluss der räumlichen Beziehung bimodaler Reize auf den Redundanzeffekt wurde in zwei Arbeiten untersucht: Forster et al. (2002) verglichen Reaktionszeiten auf visuell-taktile Reize, die in unterschiedlicher räumlicher Beziehung zueinander präsentiert wurden. Sie fanden einen sehr geringen Vorteil von 3 ms (n. s.) für redundante visuell-taktile Reize, die am glei-

chen Ort dargeboten wurden, gegenüber Reizen, die an unterschiedlichen Orten dargeboten wurden. Hughes et al. (1994, Exp. 3) beobachteten keinen Vorteil für räumlich kongruente auditiv-visuelle Reize (0 ms). Zumindest bei Einfachreaktionen auf redundante bimodale Reize scheint die räumliche Beziehung der Teilstimuli also eher unwichtig zu sein.

Damit der Organismus von den redundanten Informationen aus den Sinnessystemen profitieren kann, müssen die beiden Stimuli annähernd gleichzeitig an der Station der multisensorischen Integration „ankommen“. Wird der auditive Reiz z. B. wesentlich früher präsentiert als der visuelle Reiz, reagiert die Versuchsperson nur noch auf den auditiven Reiz, denn die Aufgabe lautet ja, auf alle Reize in der gleichen Weise zu reagieren. Allerdings deuten die Ergebnisse der meisten Untersuchungen darauf hin, dass der Redundanzgewinn nicht dann am höchsten ist, wenn die Reize *gleichzeitig präsentiert* werden. Vielmehr scheint es auf die „*psychologische Gleichzeitigkeit*“ anzukommen: Einfachreaktionen auf auditive Reize sind z. B. meist schneller als auf visuelle Reize. In vielen Untersuchungen war der Redundanzgewinn dann am höchsten, wenn die Stimuli mit einem Versatz präsentiert wurden, der diesen Unterschied in etwa ausglich (Diederich & Colonius, in press; Hershenson, 1962; Miller, 1986).

Dass der Redundanzgewinn erst auf motorischen Verarbeitungsstufen anfallen könnte, wird von zwei Untersuchungen nahegelegt: Diederich und Colonius (1987) untersuchten Redundanzgewinne bei auditiv-visuellen redundanten Reizen, die mit unterschiedlichem Versatz (*stimulus onset asynchrony*, SOA) dargeboten wurden. Die Besonderheit ihres Versuchsaufbaus bestand darin, dass die Versuchspersonen mit beiden Händen auf die Stimuli reagieren mussten. Hierbei zeigte sich, dass die Differenz (genau genommen, nicht die mittlere Differenz, sondern die Streuung der Differenzen) zwischen der Reaktionszeit der linken Hand (RT_l) und der Reaktionszeit der rechten Hand (RT_r) vom SOA abhängig war: Da Wahrnehmung, Antwortselektion und prämotorische Anteile durch die Differenzbildung ($RT_l - RT_r$) eliminiert werden sollten, bedeutet dies, dass „*something is in fact going on in the motor component*“ (Diederich & Colonius, 1987, S. 27). Für eine motorische Komponente des Redundanzeffekts

spricht auch der Befund von Giray und Ulrich (1993): Die Autoren beobachteten, dass die Kraft, mit der die Versuchsperson auf die Reaktionstaste drückt, beim redundanten Reiz höher ist als beim unimodalen Reiz. Dieser Befund konnte allerdings in einer späteren Untersuchung nicht repliziert werden (Plat, Praamstra & Horstink, 2000), bzw. scheint unspezifisch mit der Anzahl nicht-redundanter Stimuli einherzugehen, die auf dem Bildschirm dargeboten werden (Mordkoff et al., 1996). Untersuchungen der neuronalen Antwort auf redundante Reize im motorischen Kortex bei Makakken (Miller, Ulrich & Lamarre, 2001) erbrachten zudem keinen Hinweis auf Koaktivierung bei motorischen Prozessen.

0.4 Superpositionsmodell der Koaktivierung

Ein Modell, das spezifische Vorhersagen zum Reaktionszeitgewinn durch Koaktivierung macht, wurde von Schwarz (1989) vorgeschlagen. Es handelt sich hierbei um ein reines Prozessmodell, d. h., es werden keine Angaben darüber gemacht, an welcher Stelle die Koaktivierung stattfindet, sondern vielmehr wie der Mechanismus der Koaktivierung selbst aussehen könnte: Schwarz nimmt an, dass unimodale auditive oder visuelle Stimuli neuronale Vorgänge auslösen, bei denen in irgendeiner Weise Aktivierung aufgebaut wird. Der Aufbau der Aktivierung kann als Zählprozess aufgefasst werden, bei dem in zufälligen Abständen Impulse eingehen. Der Abstand zwischen zwei Zählimpulsen kann über poissonverteilte Zufallsvariablen modelliert werden. Übersteigt die Aktivierung eine bestimmte Schwelle, wird die Reaktion ausgelöst. Die Schwelle wird z. B. dann erreicht, wenn 10 solcher Impulse eingegangen sind. Bei redundanten Reizen wirken zwei Zählprozesse gleichzeitig („Superpositionsmodell“, Townsend & Ashby, 1983, vgl. Abb. 0.2 und Simulation in Kap. 1). Der Schwellenwert wird entsprechend früher erreicht, was im Endeffekt zu schnelleren Reaktionen führt. Schwarz (1989) wandte diese Methode zur Vorhersage der Reaktionszeiten auf bimodale Reize an. Die mittleren Reaktionszeiten auf bimodale Reize konnten hiermit sehr gut vorhergesagt werden (Schwarz, 1989), die Standardabweichungen allerdings

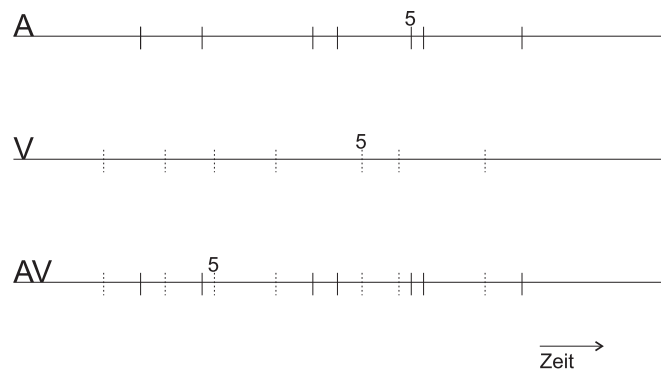


Abbildung 0.2: Superposition zweier Poisson-Zählprozesse. Der auditive Reiz (A) bzw. der visuelle Reiz (V) löst einen Zählprozess aus, der nach 5 Impulsen eine Schwelle erreicht und eine „Reaktion“ initiiert. Im bimodalen Reiz AV überlagern sich die beiden Zählprozesse, die 5 Impulse werden entsprechend schneller erreicht.

nicht (Diederich & Colonius, 1991).

0.5 Energy summation und preparation enhancement

Nickerson (1973) stellte ein Modell zur Erklärung von intersensorischen Erleichterungseffekten vor (Abb. 0.3). Nach diesem Modell wird die Aktivierung der Sinneskanäle entweder dazu verwendet, eine Reaktion auszulösen (*evoke response*), oder die Reaktionsbereitschaft des Gesamtsystems zu erhöhen (*prepare response*). Das Modell soll v. a. Reaktionszeitgewinne in Experimenten erklären, in denen Versuchspersonen nur auf Stimuli in einer Modalität reagieren sollen, wobei in einigen Durchgängen zusätzliche Reize in einer anderen Modalität dargeboten werden (z. B. Bernstein & Edelstein, 1971; Bernstein et al., 1969; Simon & Craft, 1970). Wie schon erwähnt, führt der zusätzliche (zumeist auditive) Reiz zu schnelleren Reaktionen, obwohl er selbst für

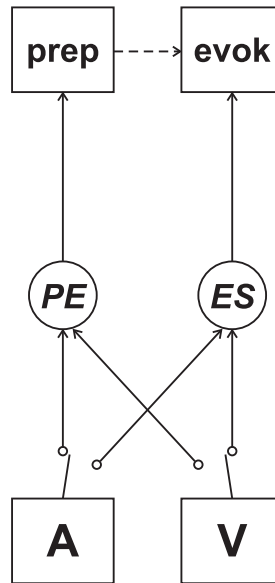


Abbildung 0.3: Nickersons (1973) Modell der intersensorischen Erleichterung bei Aufgaben, in denen die Versuchsperson auf Stimuli eines Sinneskanal (hier V, visueller Kanal) reagieren soll, und manchmal zusätzlich Stimuli des anderen Kanals (hier A, auditiver Kanal) präsentiert werden. Auf AV-Stimuli reagiert die Versuchsperson schneller, Nickerson erklärt diesen Effekt damit, dass die auditiven Reize als Warnsignal wirken und damit zu einem *preparation enhancement* (PE) führen, das die Reaktionsbereitschaft des Gesamtsystems erhöht (prep). Die visuellen Stimuli lösen dann schnellere Reaktionen aus (evok). Im Redundanzexperiment werden beide Sinneskanäle mit „evok“ verbunden, auf diese Weise ist auch *energy summation* (ES) möglich. Nickerson argumentiert allerdings, dass PE und *statistical facilitation* ausreichen, die schnelleren Reaktionen bei AV zu erklären, er kommt daher ohne das ES-Modul aus.

die Aufgabe irrelevant ist und sogar einen gewissen Reaktionskonflikt auslösen könnte, denn die Versuchspersonen sollten auf einen alleine dargebotenen auditiven Reiz ja gar nicht reagieren. Nickerson argumentiert, dass die Versuchspersonen die „Schalter“ kontrollieren können, die einen Sinneskanal mit *prepare response* oder *evoke response*

verbinden, und den zusätzlichen auditiven Reiz entsprechend effizient als Warnsignal verwenden können (*preparation enhancement*). Im Redundanzexperiment, in dem die Versuchspersonen auf beide Reize gleichermaßen reagieren sollen, sind entsprechend beide Schalter mit *evoke response* verbunden. Die Darstellung in Abbildung 0.3 weicht vom Originalmodell Nickersons (1973) insofern ab, als zusätzlich *energy summation* angenommen wird, d. h. die Aktivierung der beiden Teilstimuli eines redundanten Reizes wird neben *preparation enhancement* noch in irgendeiner Weise integriert. Nickerson wandte sich explizit gegen *energy summation*, in seinem Modell wird nur *statistical facilitation* angenommen, um die schnelleren Reaktionszeiten bei redundanten Reizen zu erklären, im ES-Modul in Abbildung 0.3 passiert nach Nickerson sozusagen nichts.

0.6 Zelluläre Mechanismen

Eine multisensorische Hirnregion, die bereits sehr eingehend untersucht wurde, ist der *Colliculus superior* (Stein & Meredith, 1993). Neurone in den tieferen Schichten des *Colliculus superior* haben räumlich überlappende receptive Felder für mehrere Sinnesmodalitäten. Ein auditiv und visuell ansprechbares Neuron reagiert entsprechend auf auditive und visuelle unimodale Reize, wenn sie im jeweiligen rezeptiven Feld dargeboten werden. Fallen beide Komponenten eines bimodalen (auditiv-visuellen) Reizes in das jeweilige receptive Feld, so reagiert das Neuron besonders stark; die resultierende Aktivität ist dabei häufig höher als die Summe der Antworten auf die unimodalen Reizkomponenten (*response enhancement*). Wegen der Überlappung der rezeptiven Felder findet *response enhancement* v. a. bei räumlich kongruenten bimodalen Reizen statt, wenn also beide Reizkomponenten am selben Ort präsentiert werden (*spatial rule*, Kadunce, Vaughan, Wallace & Stein, 2001; Meredith & Stein, 1987). Liegt eine der beiden Reizkomponenten hingegen außerhalb des rezeptiven Feldes, wird die Antwort des Neurons unterdrückt (*response depression*). Voraussetzung für *response enhancement* ist, dass die Reize gleichzeitig dargeboten werden bzw. dass die Maxima der unimodalen neuronalen Antworten ungefähr aufeinander fallen (± 100 ms, *temporal*

rule, Meredith, Nemitz & Stein, 1987). Das spezifische Antwortverhalten der Neurone im Colliculus superior ist nicht angeboren, sondern entwickelt sich erst während der ersten Lebensmonate, wenn der Organismus erste Sinneserfahrungen macht (Anastacio & Patton, 2004; Wallace & Stein, 2000, 2001).

Das relative Ausmaß des *response enhancement* ist abhängig von der Intensität der Reizkomponenten: Schwache Reize werden in hohem Maße verstärkt, deutlich überschwellige Reize werden nur gering bzw. gar nicht verstärkt (*inverse effectiveness rule*, Meredith & Stein, 1987; Stein, 1998). Da der Colliculus superior an Funktionen wie Aufmerksamkeitszuwendung, Orientierungsreaktionen, koordinierten Kopf- und Augenbewegungen beteiligt ist (Stein & Meredith, 1993), scheint dieser Mechanismus v. a. der Verstärkung von schwachen, multisensorischen Umgebungsreizen zu dienen, zu denen sich der Organismus dann hinorientieren kann. Bernstein (1970) wies diesen Effekt auch bei Reaktionen auf auditiv-visuelle Reize verschiedener Intensität nach: Bei schwachen Reizen ließen sich große intersensorische Erleichterungseffekte bei bimodaler Stimulation zeigen, bei deutlich wahrnehmbaren Reizen hingegen nur geringe Vorteile.

Auf Kortexebene finden sich zahlreiche multisensorische Hirnregionen, von denen der intraparietale Sulcus eine zentrale Rolle bei der visuellen Aufmerksamkeit (Bisley, Krishna & Goldberg, 2004; Macaluso, Frith & Driver, 2002) und der Repräsentation von Positionsinformationen (Andersen, Snyder, Bradley & Xing, 1997; Avillac, Olivier, Denève, Ben Hamed & Duhamel, 2004; Colby & Goldberg, 1999) spielt. Der superiore temporale Sulcus scheint an der Objektidentifikation beteiligt zu sein (Beauchamp, Lee, Argall & Martin, 2004). Im orbitofrontalen Kortex sollen Valenz und gelernte Assoziationen repräsentiert sein (vgl. Rolls, 2004). Der Colliculus superior ist v. a. mit den posterioren kortikalen Regionen verbunden (Jiang, Jiang & Stein, 2002). Er erhält Projektionen aus dem anterioren ektosylvischen Sulcus (AES der Katze, das menschliche Homolog dürfte in der temporo-parietalen Übergangsregion liegen) und dem rostralen lateralen suprasylvischen Sulcus (rLS, Jiang, Wallace, Jiang, Vaughan & Stein, 2001). *Response enhancement* und *response depression* der Neurone im Col-

liculus superior scheinen von diesen Projektionen abhängig zu sein, denn cryogene Blockade bzw. Läsionen in AES oder rLS führen zum zeitweiligen oder dauerhaften Verlust dieser Antwortigenschaften (Jiang et al., 2001; Wallace & Stein, 1994).

0.7 Überblick über die Teilstudien

In Kapitel 1 (vgl. Gondan & Röder, 2004a, submitted) wird gezeigt, wie der *race model*-Test auf Situationen mit drei redundanten Stimuli verallgemeinert werden kann. Allein aufgrund von *statistical facilitation* liegt die Vermutung nahe, dass die mittleren Reaktionszeiten auf einen trimodalen redundanten Reiz (taktil-auditiv-visuell) schneller sind als auf einen bimodalen redundanten Reiz. Das bedeutet aber nicht, dass die Informationen der drei Sinnessysteme gemeinsam integriert werden müssen. Es könnte durchaus sein, dass das taktile System getrennt verarbeitet wird, oder dass die drei Reizkomponenten jeweils paarweise miteinander verknüpft werden, d. h. es fänden lediglich auditiv-visuelle, visuell-taktile und auditiv-taktile Wechselwirkungen statt. Der in Kapitel 1 vorgeschlagene Test kann hierüber Auskunft geben.

In Kapitel 2 (vgl. Gondan, Lange, Rösler & Röder, 2004) werden Sequenzeffekte untersucht: Denkbar wäre, dass die Reaktionen auf den redundanten Reiz AV gar nicht durch irgendeinen Koaktivierungsmechanismus beschleunigt werden, sondern vielmehr die Reaktionen auf die unimodalen Reize A und V verlangsamt sind: Achtet die Versuchsperson z. B. auf den visuellen Sinneskanal, weil der Vorgängerreiz ein visueller Reiz war, dauert die Reaktion auf einen auditiven Reiz eventuell länger. Die redundanten Reize wären hiervon nicht betroffen: Weil Reize in beiden Sinnesmodalitäten dargeboten werden, kann die Versuchsperson bei redundanten Reizen „nichts falsch machen“.

Aus den Ergebnissen der Teilstudie in Kapitel 2 wird deutlich, dass *statistical facilitation* und Modalitätswechselkosten den Redundanzgewinn bei bimodalen Reizen nur teilweise erklären können. Die Informationen aus den beteiligten Sinnessystemen scheinen darüber hinaus auf irgendeine Weise integriert zu werden. Die zerebralen Me-

chanismen dieses Integrationsprozesses werden in Kapitel 3 (vgl. Gondan & Röder, 2004a) mit ereigniskorrelierten Potentialen untersucht. Es zeigt sich, dass das Gehirn in spezifischer Weise auf bimodale Reize reagiert und dass diese Antwort nicht einfach der Summe der Hirnantworten auf die unimodalen Reize entspricht.

Ein wichtiges Prinzip der multisensorischen Integration ist die räumliche und zeitliche Koinzidenz der beiden Reize. Wir ordnen verschiedene Sinneseindrücke nur dann demselben Objekt zu, wenn sie vom gleichen Ort kommen und zur gleichen Zeit eintreffen. Kommen die Eindrücke von verschiedenen Orten bzw. sind sie zeitlich versetzt, werden sie nicht integriert. Es stellt sich die Frage, ob dies auch für einen vergleichsweise basalen Effekt wie den Redundanzeffekt gilt? In Kapitel 4 (vgl. Gondan, Niederhaus, Rösler & Röder, in press) wird untersucht, ob die räumliche Beziehung der beiden Teilstimuli den Redundanzeffekt beeinflusst und wie sich ereigniskorrelierte Potentiale von auditiv-visuellen Reizen unterscheiden, je nachdem, ob sie am selben Ort oder an unterschiedlichen Orten dargeboten werden.

In Kapitel 5 (vgl. Gondan & Röder, 2004b) wurde schließlich die Bedeutung der räumlichen Aufmerksamkeit untersucht. Koordinierte Handlungen erfordern Aufmerksamkeit und Konzentration. Man könnte daher vermuten, dass die Versuchspersonen nur dann in spezifischer Weise von den redundanten Informationen profitieren, wenn diese in den Fokus der räumlichen Aufmerksamkeit fallen. In der letzten Teilstudie interessierte daher die Frage, inwieweit die Integrationsleistung beim Redundanzeffekt von der Fokussierung der räumlichen Aufmerksamkeit abhängt.

1 Trisensorische Interaktionen

1.1 Hintergrund

In einem typischen Redundanzexperiment hat die Versuchsperson die Aufgabe, in der gleichen Weise auf z. B. auditive (A), visuelle (V) und auf bimodale auditiv-visuelle (AV) Reize zu reagieren. Die Reaktionen auf AV sind dabei i. d. R. deutlich schneller als die Reaktionen auf die unimodalen Reize A und V. Dieser Effekt wird als Redundanzeffekt bezeichnet. Zur Erklärung des Redundanzeffekts wurden zwei Modelle vorgeschlagen: das *race model* und das *coactivation model* (Miller, 1982).

Im *race model* wird angenommen, dass die Informationen der beiden Sinnessysteme unabhängig voneinander verarbeitet werden. Die Reaktion auf einen einzelnen Stimulus wird dann jeweils von dem Sinneskanal ausgelöst, der den Stimulus schneller verarbeitet hat. Im Mittel ergeben sich auf diese Weise schnellere Reaktionen auf redundante Reize (AV), da die Wahrscheinlichkeit für eine schnelle Reaktion bei zwei Reizen höher ist als bei einem Reiz (*statistical facilitation*, Raab, 1962). Die obere Grenze für den Reaktionszeitgewinn, der durch diesen Mechanismus ermöglicht wird, ist durch die *race model inequality* (Miller, 1982) festgelegt:

$$p(RT_{AV} < t_0) \leq p(RT_A < t_0) + p(RT_V < t_0) \quad (1.1)$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass eine Reaktion auf einen bimodalen Reiz RT_{AV} z. B. schneller als $t_0 = 200 \text{ ms}$ ist [$p(RT_{AV} < 200 \text{ ms})$], ergibt sich nach dem *race model* aus der Summe der entsprechenden Wahrscheinlichkeiten für RT_A und RT_V . Übersteigt der Anteil der beobachteten Reaktionen diese Vorhersage, kann man schlussfolgern,

dass die Informationen der beiden Sinneskanäle an irgendeiner Station der kognitiven Verarbeitung integriert werden (*coactivation model*). Diese Station profitiert von der redundanten Information, was nicht nur zu einem höheren Anteil schneller Reaktionen führt, sondern auch zu insgesamt schnelleren Reaktionen. Bei Einfachreaktionen auf auditiv-visuelle, auditiv-taktile und visuell-taktile Reize wird i. d. R. Koaktivierung beobachtet (Kap. 1–4, Diederich & Colonius, in press; Miller, 1982, 1986; Molholm et al., 2002; Murray et al., in press).

Die vorliegende Teilstudie untersucht die Organisation dieses Integrationsmechanismus anhand von trisensorischen Interaktionen, d. h. der Verarbeitung von redundanten auditiv-visuell-taktilen Dreifachstimuli. Zwei Modelle der trisensorischen Stimulusverarbeitung sind hierbei denkbar: Die Informationen aus den einzelnen Sinnessystemen könnten (a) jeweils paarweise integriert werden. Bei Reaktionen auf trimodale Reize würden dann deutliche Redundanzgewinne verzeichnet, da auditiv-visuelle, auditiv-taktile und visuell-taktile Koaktivierungsmechanismen u. U. gleichzeitig ablaufen ($A \times V$, $A \times T$, $V \times T$). Gemäß einem *race model* würde die Reaktion dann vom schnellsten dieser drei Verarbeitungswege ausgelöst. Im Gegensatz dazu wäre (b) denkbar, dass die Informationen der drei Sinnessysteme gemeinsam an einer Instanz zusammenlaufen und integriert werden. In diesem Falle wären auch echte trisensorische Redundanzgewinne ($A \times V \times T$) möglich, die über die bisensorischen Redundanzgewinne hinausgehen. Zur Untersuchung trisensorischer Interaktionen wird Gleichung 1.1 zunächst für drei redundante Reize verallgemeinert (vgl. Diederich, 1992):

$$p(RT_{TAV} < t_0) \leq p(RT_T < t_0) + p(RT_A < t_0) + p(RT_V < t_0) \quad (1.2)$$

Der Anteil der Reaktionen auf den auditiv-visuell-taktilen Stimulus (TAV), die schneller sind als t_0 , liegt also nach dem trisensorischen *race model* nicht höher als die Summe der entsprechenden Anteile bei den Reaktionen auf die unimodalen Stimuli T, A und V. Wird diese Vorhersage verletzt, kann man allerdings nicht automatisch auf trisensorische Interaktionen schließen: Auch bisensorische Redundanzgewinne (z. B. durch auditiv-visuelle Koaktivierung) sind bei einem trimodalen Reiz möglich. Diese

erhöhen ebenfalls den rechten Term in Gleichung 1.2 und führen damit zu einer Verletzung der Vorhersage des *race model*. Eine Verletzung von Gleichung 1.2 bedeutet daher nur, dass eine oder mehrere der möglichen Interaktionen $A \times V$, $A \times T$, $V \times T$ oder $A \times V \times T$ einen Redundanzgewinn verursacht.

Ist man spezifisch an $A \times V \times T$ interessiert, müssen $A \times V$, $A \times T$ und $V \times T$ aus dem Vergleich in Gleichung 1.2 eliminiert werden. Dies kann erreicht werden, indem die Reaktionszeitverteilung auf TAV nicht mit der Summe der Verteilungen der Einzelstimuli (T, A und V) verglichen wird, sondern TAV als quasi „bisensorische“ Kombination eines bi- und eines unimodalen Reizes (z. B. TA und V) aufgefasst wird. In Gleichung 1.2 wird also $p(RT_T < t_0) + p(RT_A < t_0)$ durch $p(RT_{TA} < t_0)$ ersetzt:

$$\begin{aligned} p(RT_{TAV} < t_0) &\leq \underbrace{p(RT_T < t_0) + p(RT_A < t_0)} + p(RT_V < t_0) \\ p(RT_{TAV} < t_0) &\leq \underline{p(RT_{TA} < t_0)} + p(RT_V < t_0) \end{aligned} \quad (1.3)$$

Findet bei der Verarbeitung des trimodalen Reizes Koaktivierung zwischen dem auditiven und dem taktilen System statt ($A \times T$), werden sowohl $p(RT_{TAV} < t_0)$ auf der linken Seite als auch $p(RT_{TA} < t_0)$ auf der rechten Seite erhöht. Gleichung 1.3 ist also robust gegenüber auditiv-taktiler Koaktivierung. Liegt die beobachtete Häufigkeitsverteilung von TAV über der Summe aus TA und V, bleiben allerdings noch weitere drei Kandidaten für den Redundanzgewinn übrig: $A \times V$, $V \times T$ und $A \times V \times T$. Durch die Substitution von $p(RT_T < t_0) + p(RT_A < t_0)$ durch $p(RT_{TA} < t_0)$ konnte die auditiv-taktile Interaktion eliminiert werden. Wünschenswert wäre, gleichermaßen $p(RT_T < t_0) + p(RT_V < t_0)$ durch $p(RT_{TV} < t_0)$ und $p(RT_A < t_0) + p(RT_V < t_0)$ durch $p(RT_{AV} < t_0)$ zu ersetzen, damit nur noch die trisensorische Interaktion übrig bleibt. Hierfür wird $p(RT_T < t_0)$ zunächst auf beiden Seiten von Gleichung 1.3 addiert und anschließend der Term $p(RT_T < t_0) + p(RT_V < t_0)$ durch $p(RT_{TV} < t_0)$ ersetzt (Gl. 1.4):

$$\begin{aligned} p(RT_{TAV} < t_0) + p(RT_T < t_0) &\leq p(RT_{TA} < t_0) + \underbrace{p(RT_V < t_0) + p(RT_T < t_0)} \\ p(RT_{TAV} < t_0) + p(RT_T < t_0) &\leq p(RT_{TA} < t_0) + \underline{p(RT_{TV} < t_0)} \end{aligned} \quad (1.4)$$

Gleichung 1.4 wurde von Diederich (1992) und Diederich und Colonius (2004, in press) vorgeschlagen, um trisensorische Interaktionen zu ermitteln. Allerdings wird Gleichung 1.4 auch dann verletzt, wenn auditiv-visuelle bisensorische Interaktionen zu Redundanzgewinnen führen, denn diese erhöhen wiederum nur den linken Term. Diederich und Colonius (2004, in press) schlagen daher vor, die Modalitäten in Gleichung 1.4 zu rotieren, um den Test konservativer zu machen (rechts sind jeweils diejenigen Interaktionen angegeben, die bei einer Verletzung der *race model*-Vorhersage für die Koaktivierung in Frage kommen):

$$p(RT_{TAV} < t_0) + p(RT_T < t_0) \leq p(RT_{TA} < t_0) + p(RT_{TV} < t_0) \quad A \times V, A \times V \times T$$

$$p(RT_{TAV} < t_0) + p(RT_A < t_0) \leq p(RT_{AV} < t_0) + p(RT_{TA} < t_0) \quad V \times T, A \times V \times T$$

$$p(RT_{TAV} < t_0) + p(RT_V < t_0) \leq p(RT_{TV} < t_0) + p(RT_{AV} < t_0) \quad A \times T, A \times V \times T$$

Nur wenn alle drei Tests Koaktivierung anzeigen, kann man auf trisensorische Interaktionen schließen (Diederich & Colonius, 2004, in press). Die Frage nach dem spezifischen Beitrag von $A \times V \times T$ wird hierdurch allerdings nicht befriedigend beantwortet. Es kann nämlich nicht ausgeschlossen werden, dass bei der Verarbeitung eines trimodalen Reizes gleichzeitig Redundanzgewinne durch alle drei möglichen bisensorischen Interaktionen anfallen: In der vorliegenden Teilstudie wurden z. B. stabile Koaktivierungseffekte bei Reaktionen auf auditiv-visuelle, auditiv-taktile und visuell-taktile Stimuli beobachtet (vgl. Abb. 1.3b–d). Entsprechend wäre denkbar, dass alle drei genannten Vergleiche Koaktivierung anzeigen, auch wenn es keinen spezifischen Redundanzgewinn durch die trisensorische Interaktion gibt. Zudem verliert man durch dieses Vorgehen an Teststärke, weil drei statistische Tests mit „und“ verknüpft werden.

Die vorliegende Teilstudie schlägt daher einen neuen Test für trisensorische Interaktionen vor: Hierfür wird Gleichung 1.4 in einem letzten Schritt auf beiden Seiten um $p(RT_A < t_0) + p(RT_V < t_0)$ erweitert und schließlich auf der rechten Seite $p(RT_A < t_0) + p(RT_V < t_0)$ durch $p(RT_{AV} < t_0)$ ersetzt (Gl. 1.5):

$$\begin{aligned}
& p(RT_{TAV} < t_0) + p(RT_T < t_0) + p(RT_A < t_0) + p(RT_V < t_0) \dots \\
& \leq p(RT_{TA} < t_0) + p(RT_{TV} < t_0) + \underbrace{p(RT_A < t_0) + p(RT_V < t_0)} \\
& p(RT_{TAV} < t_0) + p(RT_T < t_0) + p(RT_A < t_0) + p(RT_V < t_0) \dots \\
& \leq p(RT_{TA} < t_0) + p(RT_{TV} < t_0) + \underline{p(RT_{AV} < t_0)}
\end{aligned} \tag{1.5}$$

Hierdurch wird der Vergleich robust gegenüber Redundanzgewinnen durch auditiv-visuelle Koaktivierung. Wenn Gleichung 1.5 verletzt wird, kann man daher auf einen Redundanzgewinn durch spezifisch trisensorische Koaktivierung schließen. Der Nutzen des neuen Vergleichs soll nun anhand einer Simulation und anhand empirischer Reaktionszeitdaten illustriert werden. In der Simulation wurden Reaktionszeiten auf trimodale Reize generiert, wobei multisensorische Wechselwirkungen entweder zwischen zwei ($A \times V$, $A \times T$, $V \times T$) oder drei Modalitäten ($A \times V \times T$) angenommen wurden. Die durch die Simulation generierten Reaktionszeitverteilungen wurden dann gemäß Gleichungen 1.2–1.5 ausgewertet. Die Reaktionszeitdaten stammen aus der EEG-Untersuchung in Kapitel 3, in der Versuchspersonen auf Zielreize in einer Sequenz von uni-, bi-, und trimodalen Reizen (auditiv, visuell, taktil) reagieren sollten.

1.2 Methode

Simulation

Die Reaktionszeiten auf unimodale Reize (T, A, V) wurden, ähnlich wie von Mordkoff (1992) beschrieben, generiert: Mordkoff simulierte frühe Wahrnehmungsprozesse mit normalverteilten Zufallszahlen, spätere Entscheidungsprozesse mit einem Poissonprozess (Schwarz, 1989) und die Dauer der motorischen Ausführung wiederum mit einer normalverteilten Zufallszahl. Für Wahrnehmungsprozesse wurden in der vorliegenden Teilstudie willkürlich $T = 310$ ms, $A = 290$ ms und $V = 300$ ms als Mittelwerte

angenommen, jeweils mit einer Standardabweichung von 50 ms. Die Aktivierung einer Reaktion wurde dann mit einem Poissonprozess ($\lambda = 10$ ms) simuliert, der eine Reaktion auslöste, wenn 30 Impulse eingegangen waren. Bei den bimodalen Reizen wurde angenommen, dass beide Sinneskanäle zum Aufbau der Aktivierung beitragen, also beide Zählprozesse gemeinsam arbeiten (Schwarz, 1989; Townsend & Ashby, 1983). Die Modellierung motorischer Prozesse wurde ausgeklammert, da sie keine Auswirkungen auf den *race model*-Test hat, sondern lediglich der Anpassung an beobachtete empirische Reaktionszeitverteilungen dient (vgl. Diederich & Colonius, 1991; Mordkoff, 1992).

Bei den trimodalen Reizen wurden zwei Reaktionszeitverteilungen generiert: In der einen Verteilung wurde trisensorische Koaktivierung angenommen, es arbeiteten also alle drei Zählprozesse am Aufbau der Aktivierung. In der anderen Verteilung wurde nur bisensorische Koaktivierung angenommen: Hier wurden zunächst die Reaktionszeiten für TA, TV und AV bestimmt und dann die schnellste der drei auf diese Weise ermittelten Reaktionen verwendet.

Stichprobe

19 Versuchspersonen (Studenten des Fachbereichs Psychologie, Philipps-Universität Marburg, 12 weiblich, 7 männlich, 20–32 Jahre) nahmen freiwillig an der Untersuchung teil. Alle konnten normal hören und ihre Sehfähigkeit war nicht beeinträchtigt bzw. durch eine Brille korrigiert.

Stimuli und Aufgabe

Es wurden uni-, bi- und trimodale auditive, visuelle und taktile Stimuli dargeboten („Standardreize“, jeweils 405 Darbietungen). Die auditiven Reize (A) waren kurzes weißes Rauschen (20 ms, 60 dBA), der visuelle Reiz (V) war ein Aufblinken (20 ms) von zwei über den Lautsprechern montierten Leuchtdioden (60 mcd), als taktiler Reiz (T) wurde ein mechanischer Impuls eines kleinen Stifts (Durchmesser 0.5 mm) verwen-

det, der für 20 ms auf den rechten Zeigefinger gedrückt wurde. Damit die Versuchspersonen das Geräusch des taktilen Stimulators nicht hörten, wurde ihnen ein Kopfhörer aufgesetzt, über den leises Rauschen konstant dargeboten wurde. Die Lautstärke wurde jeweils individuell so niedrig eingestellt, dass die Versuchspersonen den Taktilstimulator gerade nicht mehr hören konnten.

Bimodale Reize waren alle möglichen Kombinationen der unimodalen Reize (AV, TA, TV), der trimodale Reiz war entsprechend ein auditiv-visuell-taktiler Reiz (TAV). Das Intervall zwischen zwei Stimuli (ISI) betrug 1300–1700 ms. Zusätzlich wurde 405 mal nach dem üblichen ISI kein Reiz dargeboten (O). In 10 % der Fälle wurden die Reize doppelt dargeboten (AA, VV, TT, AAVV, TTAA, TTVV, TTAADV, „Zielreize“, jeweils 45 Darbietungen), hierauf sollten die Versuchspersonen per Fußschalter reagieren, so schnell wie möglich, aber trotzdem korrekt. Das Experiment dauerte ca. zwei Stunden, aufgeteilt in 15 Blöcke zu jeweils 5 Minuten. Nach jedem Block erhielt die Versuchsperson Rückmeldung über Auslassungen und Fehlreaktionen.

Datenauswertung

Die kumulierten Häufigkeitsverteilungen der Reaktionszeiten auf alle Stimuli wurden wie bei Corballis (2002) bestimmt: Zunächst wurden für jede Versuchsperson aus allen Reaktionszeiten 18 *bins* gleicher Anzahl erstellt. In einem zweiten Schritt wurden die Reaktionszeiten zu den verschiedenen Stimuli in die *bins* sortiert und die Anzahl durch die Gesamtzahl der jeweils gültigen Reaktionen geteilt, um relative Häufigkeiten zu erhalten. Schließlich wurde für jeden *bin* ein Vorzeichentest gerechnet, um zu testen, ob bin_{AV} größer ist als $bin_A + bin_V$. Gleichung 1.1 wurde für die Reaktionszeiten auf bimodale Reize verwendet, Gleichungen 1.2–1.5 für die Reaktionszeiten auf trimodale Reize.

1.3 Ergebnisse

Simulation

Abbildung 1.1a zeigt die kumulierten Häufigkeitsverteilungen (CDFs) zu allen uni-, bi- und trimodalen Reizen der Simulation. Die simulierten Reaktionen waren am schnellsten für trimodale Reize, gefolgt von den Reaktionen auf bimodale Reize und den Reaktionen auf unimodale Reize. Abbildungen 1.1b–d zeigen die *race model*-Tests für die bimodalen Reize: In allen bimodalen Bedingungen war der Anteil der schnellen Reaktionen höher als vom *race model* vorhergesagt. Abbildungen 1.2a–d zeigen die trimodalen *race model*-Tests für Gleichungen 1.2–1.5. In Abbildung 1.2a ist ein hoher Koaktivierungseffekt erkennbar, sowohl bei der Reaktionszeitverteilung auf trimodale Reize, die unter Annahme von trisensorischen Interaktionen generiert wurde, als auch bei derjenigen, bei der nur bisensorische Interaktionen angenommen wurden.

Werden die bisensorischen Interaktionen schrittweise im *race model*-Test berücksichtigt (vgl. Gl. 1.3–1.5), verringert sich der Koaktivierungseffekt (Abb. 1.2b–d). Nur mit Hilfe des Tests von Gleichung 1.5 (Abb. 1.2d) lassen sich die beiden trimodalen Reaktionszeitverteilungen unterscheiden: Wird trisensorische Koaktivierung angenommen (∇), zeigt der Test in Abbildung 1.2d eine Verletzung des *race model* an, wird nur bisensorische Koaktivierung angenommen (Δ), wird die Vorhersage des *race model* eingehalten.

Reaktionszeiten

Die mittleren Reaktionszeiten zu den Zielreizen in der EEG-Untersuchung in Kapitel 3 sind in Tabelle 1.1 wiedergegeben. Abbildung 1.3a zeigt die kumulierten Reaktionszeitverteilungen zu den uni-, bi- und trimodalen Reizen. Reaktionen auf bimodale Reize waren deutlich schneller als auf unimodale Reize ($t_{18} = 12.3$, $p < .01$). Gleichung 1.1 zeigte in allen bimodalen Bedingungen Koaktivierung an (vgl. Abb. 1.3b–d).

Reaktionen auf trimodale Reize waren nochmals deutlich schneller als auf bimo-

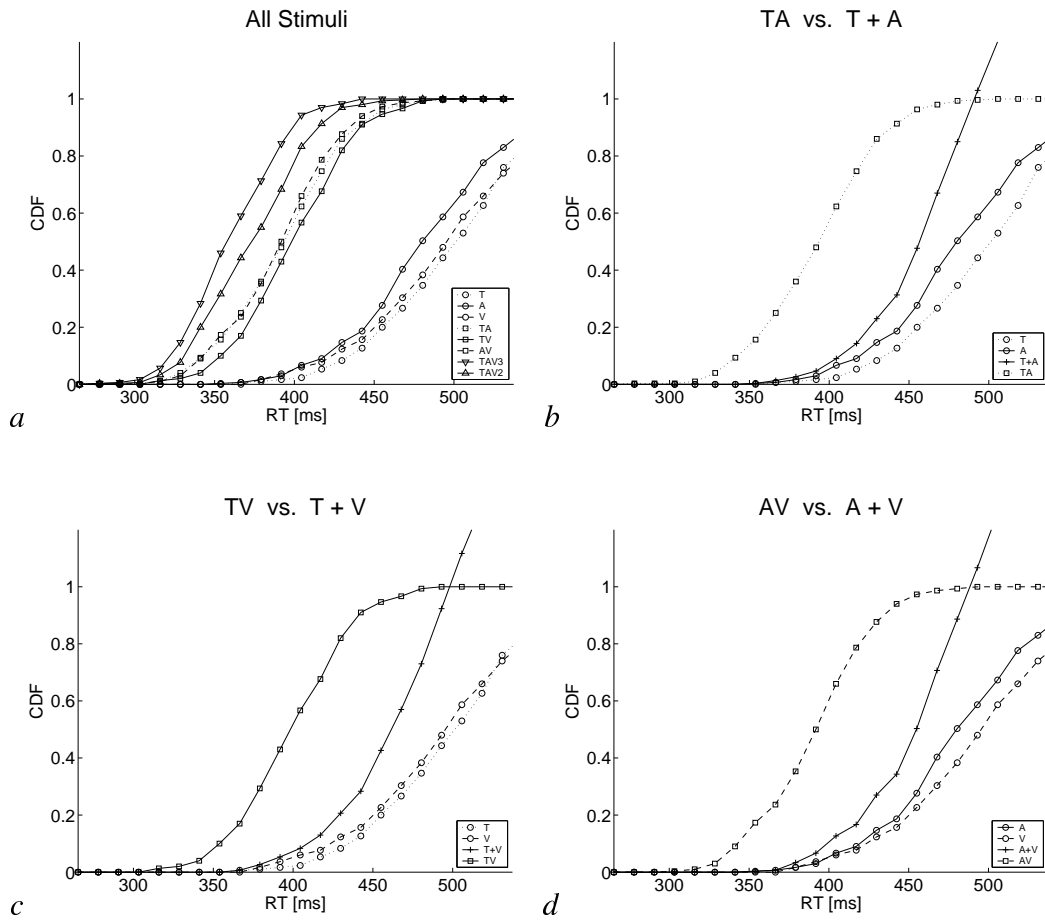


Abbildung 1.1: (a) Kumulierte Häufigkeitsverteilung der simulierten Reaktionszeiten für die verschiedenen Stimuli, \circ : unimodale Reize, \square : bimodale Reize, ∇ : trimodale Reize mit trisensorischer Koaktivierung, Δ : trimodale Reize mit lediglich bisensorischer Koaktivierung. (b–d) In allen bimodalen Bedingungen wird Koaktivierung beobachtet.

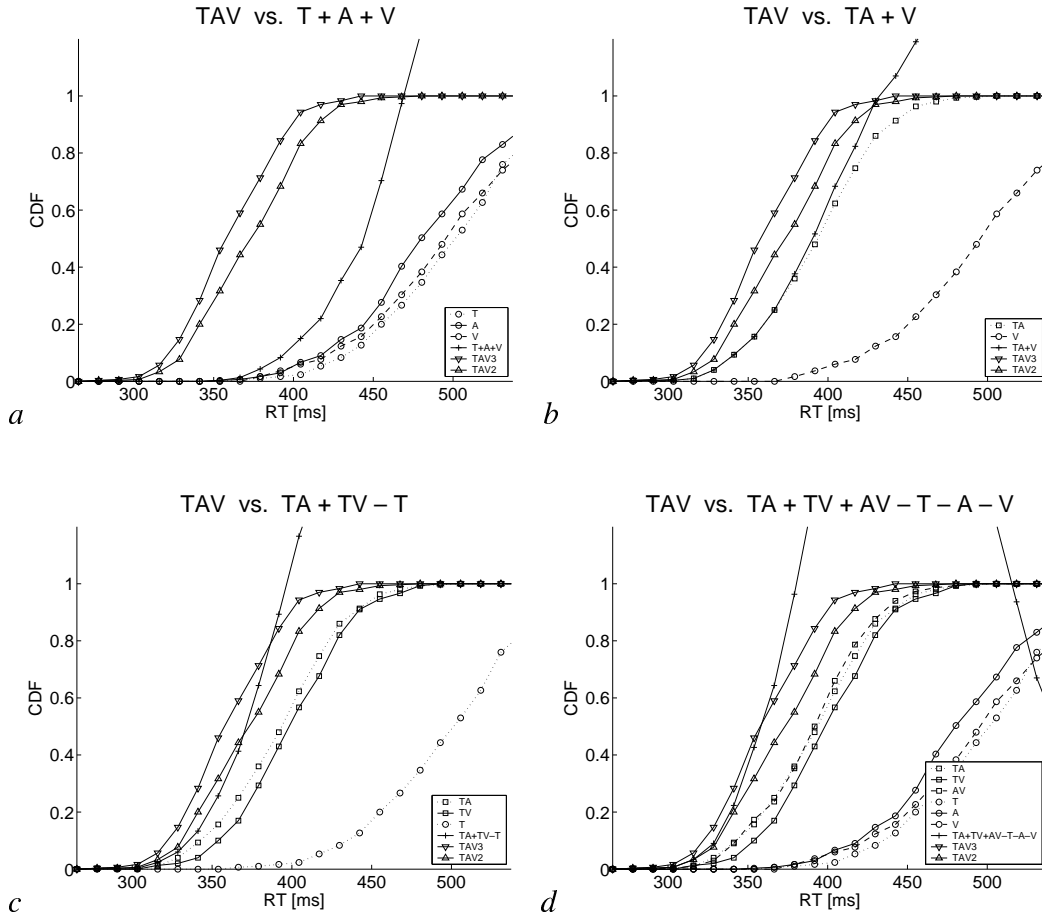


Abbildung 1.2: Trisensorische *race model*-Tests nach Gleichungen 1.2–1.5 mit simulierten Daten. Wird trisensorische Koaktivierung angenommen (∇), zeigen alle Tests Koaktivierung an (a–d). Wird nur bisensorische Koaktivierung angenommen (Δ), zeigen die Tests nach Gleichungen 1.2–1.4 (a–c) Koaktivierung an, nicht jedoch der Test nach Gleichung 1.5 (d).

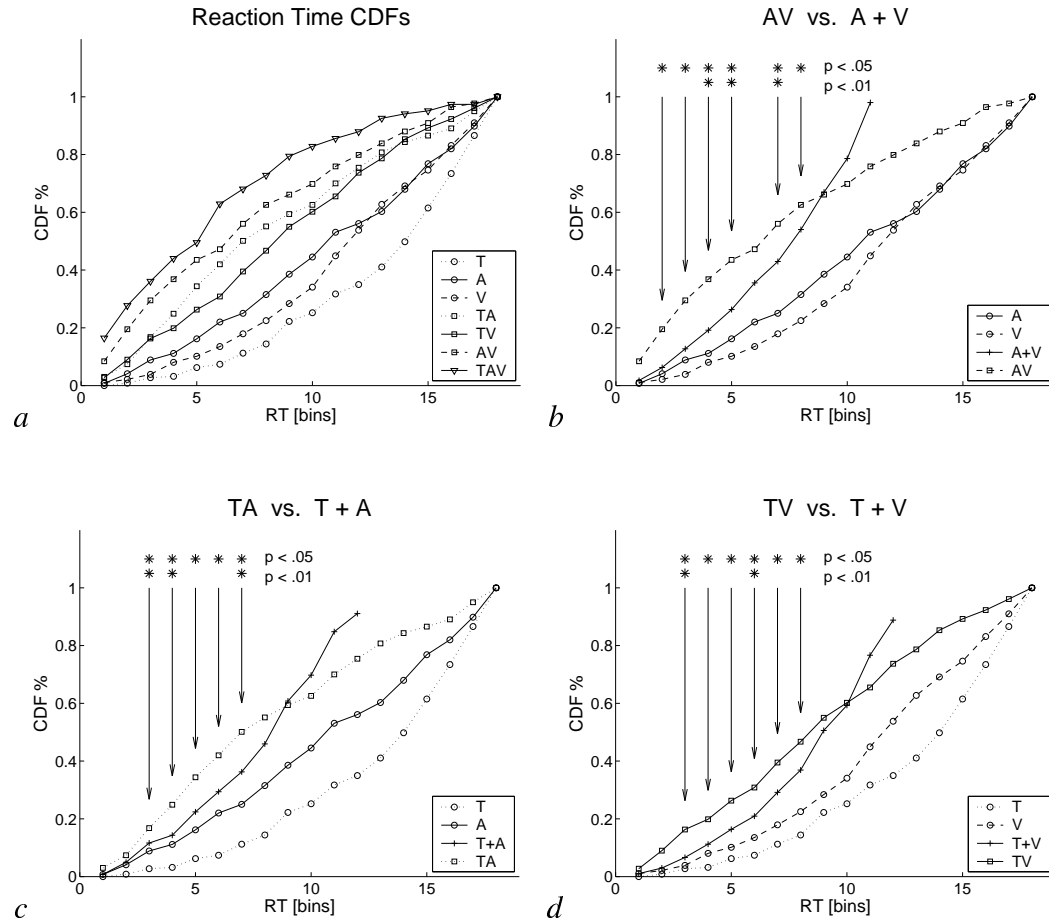


Abbildung 1.3: (a) Kumulierte Häufigkeiten der Reaktionszeiten für uni-, bi- und tri-modale Reize aus der EEG-Untersuchung in Kapitel 3. (b–d) Bei den Reaktionszeiten auf bimodale Reize wurde Koaktivierung beobachtet. Die signifikanten *bins* wurden mit Pfeilen markiert.

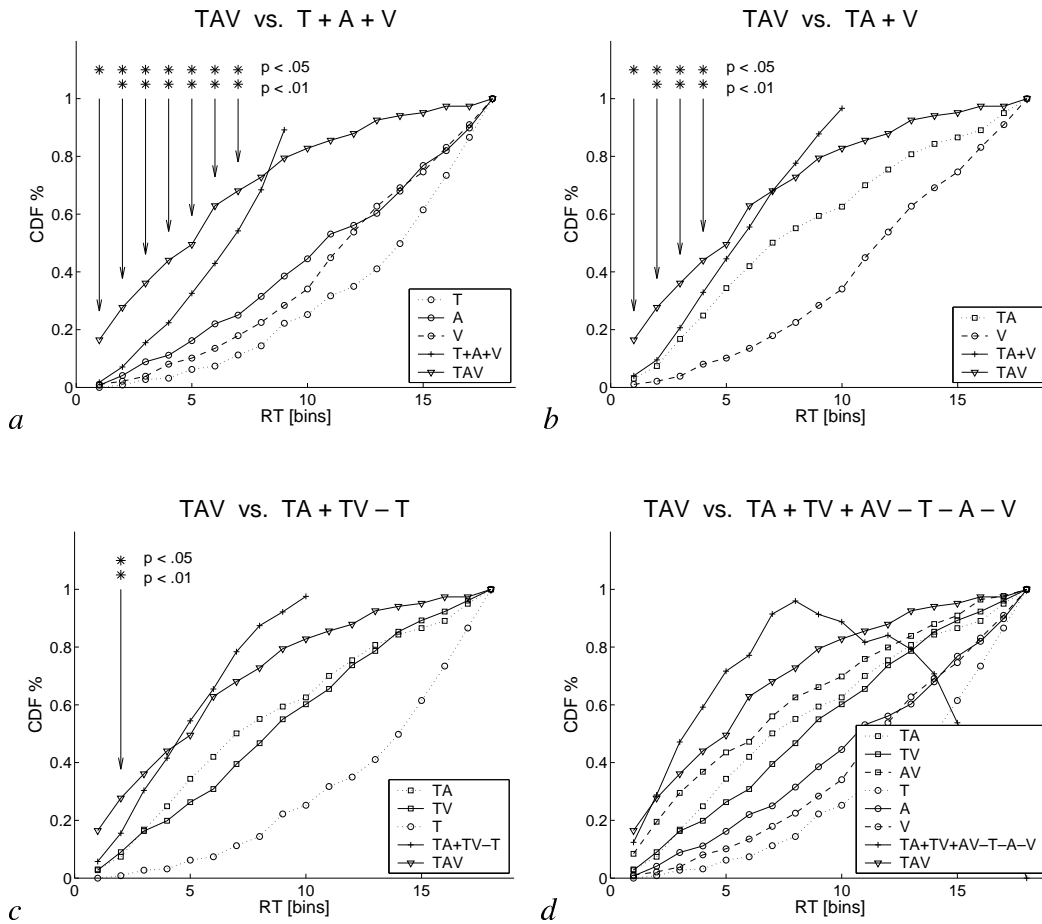


Abbildung 1.4: Trisensorische *race model*-Tests nach Gleichungen 1.2–1.5. Der Koaktivierungseffekt nimmt ab, je mehr bimodale Interaktionen eliminiert werden (a–d). Gleichung 1.5 (d) zeigt keinen Koaktivierungseffekt mehr an, es gibt demnach keinen Hinweis auf spezifisch trisensorische Redundanzgewinne in den Reaktionszeiten der EEG-Untersuchung in Kapitel 3. Der *race model*-Test in (d) würde ab *bin* 13 im Prinzip wieder Koaktivierung anzeigen. Dies liegt daran, dass der Ausdruck des rechten Terms in Gleichung 1.5 bei Null endet. Der *race model*-Test ist daher nur in den unteren Perzentilen sinnvoll, die Signifikanzmarkierungen ab *bin* 13 wurden deshalb entfernt.

Tabelle 1.1: Mittlere Reaktionszeiten (RT) in ms für die einzelnen Zielreize

Stimulus	RT	SE
T	544	24
A	511	21
V	530	21
TA	482	19
TV	483	18
AV	461	19
TAV	449	21

Anmerkung.

SE: Standardfehler

dale Reize ($t_{18} = 7.9$, $p < .01$). Die *race model*-Tests nach Gleichungen 1.2–1.4 zeigten Koaktivierung an (Abb. 1.4a–c). Der in der vorliegenden Teilstudie vorgeschlagene Test (Gl. 1.5) lieferte allerdings keinen Hinweis auf spezifisch trisensorische Interaktionen (Abb. 1.4d).

1.4 Diskussion

In der vorliegenden Teilstudie wurde ein neuer *race model*-Test für trisensorische Interaktionen vorgestellt (Gl. 1.5). Dieser Test wird benötigt, wenn spezifisch trisensorische Redundanzgewinne bei Reaktionen auf trimodale Reize nachgewiesen werden sollen, weil bei Reaktionen auf trimodale Reize auch bisensorische Redundanzgewinne wirksam werden können. Diese können mit Gleichung 1.4 (Diederich, 1992; Diederich & Colonius, 2004, in press) nicht eindeutig isoliert werden. Abbildungen 1.1 und 1.2 illustrierten dies anhand von simulierten Daten.

Der neue *race model*-Test wurde verwendet, um die Reaktionszeitdaten der EEG-

Untersuchung in Kapitel 3 auf spezifisch trisensorische Interaktionen zu überprüfen. Es zeigte sich, dass die Redundanzgewinne bei den Reaktionen auf trimodale Zielreize vollständig auf bisensorische Koaktivierungseffekte zurückgeführt werden können: Die *race model*-Tests nach Gleichungen 1.2–1.4 zeigten entsprechend Koaktivierung an, nicht aber der Test nach Gleichung 1.5. Trisensorische Interaktionen können zwar mit diesem Ergebnis nicht ausgeschlossen werden, da der *race model*-Test streng genommen nur zum Nachweis von Koaktivierung verwendet werden kann; der Umkehrschluss ist nicht ohne weiteres möglich. Trisensorische Interaktionen scheinen aber, wenn es sie überhaupt gab, keinen nennenswerten zusätzlichen Redundanzgewinn mehr verursacht zu haben.

Die eingangs formulierte Frage, ob die Informationen aus den Sinnessystemen jeweils paarweise integriert werden (a) oder gemeinsam an einer zentralen Station zusammenlaufen (b), kann daher unter Vorbehalt zugunsten von (a) entschieden werden. Dem würde auch entsprechen, dass bisensorische Zellen zumindest auf der Ebene des Colliculus superior überwiegen, trisensorische Zellen wurden nur in geringer Zahl beobachtet (ca. 6 %, vgl. Wallace, Meredith & Stein, 1992). Spezifisch trisensorische Antworteigenschaften dieser Zellen wurden noch nicht untersucht.

2 Modalitätswechselkosten

2.1 Hintergrund

Wie bereits erläutert, beobachtet man deutlich schnellere Reaktionen auf bimodale als auf unimodale Reize, wenn Versuchspersonen auf auditive, visuelle und bimodale Reize in der gleichen Art und Weise reagieren sollen (z. B. per Tastendruck). Hierbei übersteigt der Reaktionszeitgewinn in der Regel die Vorhersage des *race model*, so dass ein *coactivation model* angenommen wird (Miller, 1982), wonach die Reize an (mindestens) einer Station der kognitiven Verarbeitung integriert werden. Diese Station(en) profitieren von der redundanten bimodalen Stimulation, was schließlich zu schnelleren Reaktionen führt. Zur Unterscheidung der beiden Modelle schlug Miller (1982) den *race model*-Test vor (vgl. S. 7):

$$p(RT_{AV} < t_0) \leq p(RT_A < t_0) + p(RT_V < t_0) \quad (2.1)$$

Der *race model*-Test setzt allerdings voraus, dass die einzelnen Reaktionszeiten auf die verschiedenen Stimuli jeweils voneinander unabhängig sind. Diese Voraussetzung wird bei Sequenzen von Stimuli unterschiedlicher Modalität jedoch in der Regel verletzt (Spence, Nicholls & Driver, 2001). In einer zufälligen Sequenz von auditiven und visuellen Reizen sind z. B. Reaktionen auf auditive Stimuli schneller, wenn der Vorgängerreiz ebenfalls ein auditiver Stimulus war (A—A). Hat die Modalität hingegen gewechselt und folgt der auditive Reiz z. B. auf einen Lichtreiz (V—A), so ist die Reaktion auf den auditiven Reiz um ca. 30 ms langsamer. Spence et al. beobachteten diesen *modality shifting effect* (MSE, Modalitätswechselkosten) bei auditiven, visuel-

len und taktilen Reizen. Beim Wechsel von einem taktilen Reiz zu einer anderen Modalität war dieser Effekt besonders stark ausgeprägt (ca. 60 ms). Der MSE wird v. a. bei Einfachreaktionen und bei Wahlreaktionen beobachtet (R. Cohen & Rist, 1992), wenn auf den Vorgängerreiz reagiert werden sollte. Sollte auf den Vorgängerreiz nicht reagiert werden (z. B. bei einem target detection task mit wenigen Zielreizen), wurde nur ein geringer bzw. gar kein MSE beobachtet (Rist & Cohen, 1987). Weitere Sequenzefekte sind z. B. bei Stimulussequenzen zu erwarten, bei denen Stimuli an unterschiedlichen Orten dargeboten werden (*inhibition of return*, Quinlan & Hill, 1999; Tassinari, Campara, Benedetti & Berlucchi, 2002).

Von Modalitätswechselkosten sind im Redundanzexperiment in erster Linie die unimodalen Reize betroffen, da bei bimodalen Reizen immer zumindest eine der beiden Reizkomponenten dem Vorgängerreiz entspricht. Wenn aber Modalitätswechselkosten ausschließlich bei Reaktionen auf unimodale auditive und visuelle Reize wirksam werden, Reaktionen auf redundante Reize hingegen unbeeinträchtigt bleiben, könnte selbst bei Gültigkeit eines perfekten *race model* ein artifizieller Koaktivierungseffekt zustande kommen: Werden z. B. auditive, visuelle und bimodale Reize zu jeweils 1/3 in randomisierter Reihenfolge dargeboten, so folgen etwa 1/3 der auditiven Reize ihrerseits einem auditiven Reiz (A—A), 1/3 folgen einem visuellen Reiz (V—A), und 1/3 folgen einem bimodalen Reiz (AV—A). Nur ein Drittel der Reize (A—A) ist daher frei von Modalitätswechselkosten, die Reaktionen auf V—A und eventuell auch auf AV—A sind verlangsamt. Dasselbe gilt für die visuellen Reize. Entsprechend sinken die Anteile der schnellen Reaktionen auf unimodale Reize $p(RT_A < t_0)$ und $p(RT_V < t_0)$ auf der rechten Seite von Gleichung 2.1 auf 1/3 des ursprünglichen Wertes.

Da bei den bimodalen Reizen immer mindestens ein Teilstimulus dem Vorgängerreiz entspricht (A—AV, V—AV, AV—AV), sollten sie weniger von Modalitätswechseln betroffen sein. Die linke Seite von Gleichung 2.1, $p(RT_{AV} < t_0)$, bleibt daher weitgehend unverändert. Wendet man den *race model*-Test auf Reaktionszeiten an, die von Modalitätswechselkosten betroffen sind, ist daher eine Verletzung der Vorhersage des *race model* allein aufgrund der Modalitätswechselkosten möglich, ohne dass Koakti-

vierung angenommen werden muss.

Dieser Effekt wird in der Simulation in Abbildung 2.1 nochmals illustriert. Für die Simulation wurden Reaktionszeiten auf unimodale auditive und visuelle Stimuli jeweils per Zufall bestimmt. Entsprach die ebenfalls zufällig bestimmte Modalität dem Vorgängerreiz, wurde die jeweilige Reaktionszeit verwendet, wechselte hingegen die Modalität, wurden Wechselkosten (50 ms) addiert. Hierbei zählte auch der Übergang von einem bimodalen Reiz auf einen unimodalen Reiz (AV—A, AV—V) als Modalitätswechsel. Für unimodale Stimuli war die Reaktionszeit hiermit festgelegt. Für bimodale Stimuli wurden die auditiven und visuellen Reaktionszeiten wie beschrieben berechnet und gemäß dem *race model* der kleinere der beiden Werte verwendet. Wie man in Abbildung 2.1b erkennen kann, zeigt der „klassische“ *race model*-Test Koaktivierung an, obwohl die Reaktionszeiten unter Annahme eines *race model* generiert wurden.

Dieses Problem kann auf zwei Arten umgangen werden: Entweder verwendet man nur Stimuli, die nicht von Modalitätswechseln betroffen sind, also z. B. nur auditive Reize, die einem anderen auditiven Reiz folgen (A—A), nur visuelle Reize, die einem anderen visuellen Reiz folgen (V—V), und nur bimodale Reize, die ihrerseits einem bimodalen Reiz folgen (AV—AV). Wie in Abbildung 2.1c ersichtlich, liefert der *race model*-Test mit den Stimuli ohne Modalitätswechsel wieder korrekte Ergebnisse. Die andere Möglichkeit besteht darin, Untergruppen von Stimuli mit demselben Vorgängerreiz auszuwählen, also z. B. nur Reize zu verwenden, die einen auditiven Reiz zum Vorgänger haben (A—A, A—V, A—AV). Auch diese Variante liefert korrekte Simulationsergebnisse (Abb. 2.1d). Die zweite Variante ist allerdings für die Entdeckung von Koaktivierung eher ungünstig: Nimmt man vereinfachend an, dass die Signale des auditiven und des visuellen Reizes im Idealfall gleichzeitig an der Station der kognitiven Verarbeitung ankommen müssen, um maximale Koaktivierung zu erzeugen, dann sollten die Reaktionszeiten für die beteiligten Stimuli ungefähr gleich sein (vgl. Diederich & Colonius, in press; Hershenson, 1962; Miller, 1986). Nun sind Einfachreaktionen auf Töne in der Regel bereits schneller als auf Lichtreize, und die-

2 Modalitätswechselkosten

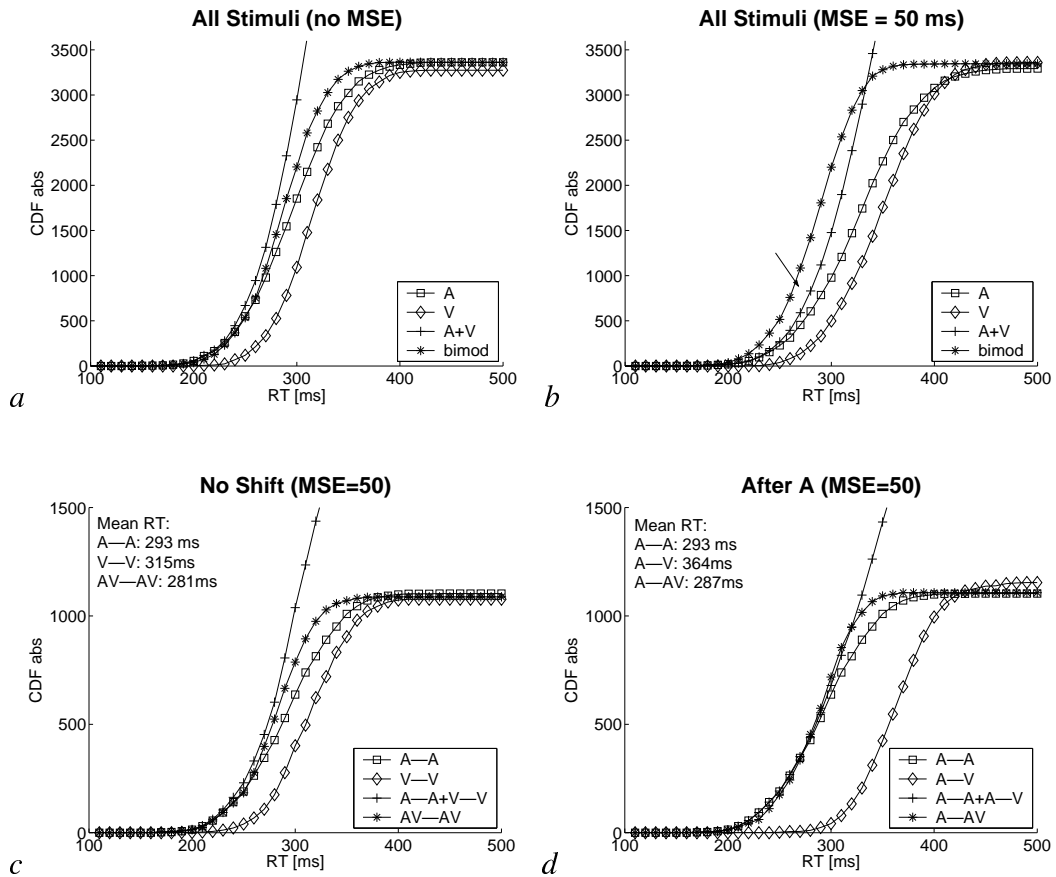


Abbildung 2.1: Simulierte Daten, in denen Reaktionszeiten auf unimodale Reize per Zufall bestimmt wurden. In (a) wurden keine Modalitätswechselkosten angenommen, in (b–d) wurde angenommen, dass ein Modalitätswechsel konstant 50 ms kostet. Die Reaktionszeiten auf die bimodalen Reize wurde jeweils per *race model* bestimmt. Es zeigt sich, dass Modalitätswechselkosten alleine eine Verletzung des *race model* verursachen können (Pfeil). In (c) wurden nur Reaktionszeiten auf wiederholte Stimuli verwendet (A—A, V—V, AV—AV). In (d) wurden nur Stimuli verwendet, die einen auditiven Reiz als Vorgängerreiz hatten (A—A, A—V, A—AV). In (c) und (d) wird die Vorhersage des *race model* eingehalten.

ser Unterschied würde noch verstärkt, wenn die Reaktionen auf visuelle Reize (A—V) durch Modalitätswechsel verlangsamt werden. Entsprechend schwieriger wird es, Koaktivierung zu entdecken, da die Versuchspersonen in dieser Situation wahrscheinlich überwiegend auf die auditiven Teilstimuli reagieren. Es empfiehlt sich daher, die Variante des modifizierten *race model*-Tests für weitere Untersuchungen zu verwenden, in der nur Stimuli ohne Modalitätswechsel in die Auswertung aufgenommen werden (vgl. Abb. 2.1c). Dies wurde in drei Experimenten mit auditiv-visuellen, auditiv-taktilen und visuell-taktilen Stimuli überprüft.

2.2 Methode

Stichprobe

Am Experiment nahmen 28 Versuchspersonen teil, 14 in der auditiv-visuellen und auditiv-taktilen Bedingung (20–31 Jahre alt, 11 davon weiblich, Studenten des Fachbereichs Psychologie der Philipps-Universität Marburg) und 14 in der visuell-taktilen Bedingung (19–30 Jahre alt, 6 davon weiblich). Seh- und Hörfähigkeit waren nach eigener Aussage in Ordnung.

Stimuli und Aufgabe

In jeder der drei Versuchsbedingungen wurden 200 unimodale Reize der ersten Modalität, 200 Reize der zweiten Modalität und 200 bimodale/redundante Reize dargeboten. Als auditiver Reiz diente ein 20 ms langes weißes Rauschen (60 dBA) aus einem Lautsprecher, der sich ca. 60 cm direkt vor der Versuchsperson befand. Als taktiler Reiz diente ein mechanischer Impuls am Zeigefinger der rechten Hand, der über zwei elektromagnetisch gesteuerte Stiftchen (0.5 mm Durchmesser, 4 mm Abstand) dargeboten wurde. Visuelle Reize wurden über zwei rote Leuchtdioden (60 mcd, 20 ms) dargeboten, die in der auditiv-visuellen Bedingung auf den Lautsprecher montiert waren und in der auditiv-taktilen Bedingung neben den Zeigefinger platziert wurden. Die Aufgabe

bestand darin, auf unimodale und bimodale Reize so schnell wie möglich durch Anheben des rechten Fußes zu reagieren. Zusätzlich wurde 100 mal nach dem üblichen Inter-Stimulus-Intervall kein Reiz dargeboten, um die Versuchspersonen von Spontanreaktionen abzuhalten. Das Inter-Stimulus-Intervall variierte zufällig zwischen 1000 und 1500 ms. Insgesamt dauerte der Versuch ca. 30 min (auditiv-visuelle und auditiv-taktile Bedingung) bzw. 20 min (visuell-taktile Bedingung).

Datenauswertung

Modalitätswechselkosten (MWK) wurden berechnet, indem die mittleren Reaktionszeiten auf die Reize mit und ohne Modalitätswechsel getrennt bestimmt und voneinander subtrahiert wurden: $MWK(V \rightarrow A) = RT(V \text{—} A) - RT(A \text{—} A)$. Die Kosten für alle anderen Modalitätswechsel wurden auf entsprechende Weise berechnet. Für die statistische Datenauswertung wurden Varianzanalysen mit Messwiederholung berechnet, mit den beiden Faktoren Sinnesmodalität und Modalitätswechsel (ja oder nein).

Der Redundanzeffekt wurde mit dem *race model*-Test (zum Vorgehen vgl. allgemeine Einleitung, S. 7 f) wie folgt überprüft: (a) unter Verwendung aller Stimuli (die „klassische“ Variante, A, V und AV), alternativ dazu (b) unter Verwendung der Reize ohne Modalitätswechsel (A—A, V—V, AV—AV), und (c) unter Verwendung der Stimuli, die auf auditive Reize folgen (A—A, A—V, A—AV), bzw. (d) unter Verwendung der Stimuli, die auf visuelle Reize folgen (V—A, V—V, V—AV).

Das Ausmaß der intersensorischen Erleichterung wurde per Mittelwertsvergleich bestimmt, hierfür wurden in der einen Analyse alle Reaktionszeiten (A, V, AV), in der anderen Analyse nur die Reaktionszeiten auf Stimuli ohne Modalitätswechsel verwendet (A—A, V—V, AV—AV). Für die Signifikanztestung wurden wiederum Varianzanalysen mit Messwiederholung berechnet, mit den beiden Faktoren Sinnesmodalität (A, V, AV) und Modalitätswechsel (ja oder nein). In der auditiv-taktilen und in der visuell-taktilen Versuchsbedingung wurde entsprechend vorgegangen.

2.3 Ergebnisse

Tabelle 2.1 gibt die Modalitätswechselkosten in den drei Versuchsbedingungen wieder. Diejenigen Reaktionen auf unimodale Stimuli, bei denen die Modalität gewechselt hatte, waren signifikant langsamer als Reaktionen auf Reize ohne Modalitätswechsel ($A \rightarrow V$, $V \rightarrow A$: $F_{1,13} = 21.0$, $p < .01$; $A \rightarrow T$, $T \rightarrow A$: $F_{1,13} = 28.8$, $p < .01$; $V \rightarrow T$, $T \rightarrow V$: $F_{1,13} = 10.7$, $p < .01$). Zum Beispiel reagierten die Versuchspersonen auf einen auditiven Reiz ohne Modalitätswechsel ($A \rightarrow A$) im Mittel innerhalb von 294 ms. War der Vorgängerreiz ein visueller Reiz ($V \rightarrow A$), verlängerte sich die mittlere Reaktionszeit auf 348 ms. Dieses Bild zeigte sich übereinstimmend für alle unimodalen Reize in allen drei Versuchsbedingungen. Wie in der Untersuchung von Spence et al. (2001) waren die Kosten am höchsten (69 ms von taktil nach auditiv, vgl. Tab. 2.1b), wenn ein Wechsel weg von der taktilen Modalität erfolgte ($A \rightarrow T$ vs. $T \rightarrow A$: $F_{1,13} = 14.4$, $p < .01$, Interaktion von *Sinnesmodalität* und *Modalitätswechsel*).

Tabelle 2.2 zeigt die mittleren Reaktionszeiten auf unimodale und redundante Reize in den drei Versuchsbedingungen, jeweils unter Einbezug aller Stimuli und unter Einbezug nur der Stimuli ohne Modalitätswechsel. Reaktionen auf redundante Reize waren im Mittel schneller als Reaktionen auf unimodale Reize. Der Reaktionszeitgewinn durch den redundanten Reiz lag bei rund 50 ms (AV : $F_{1,13} = 104.9$, $p < .01$; AT : $F_{1,13} = 147.3$, $p < .01$; VT : $F_{1,13} = 348.5$, $p < .01$). Dieser Gewinn verringerte sich geringfügig auf ca. 40 ms, wenn nur Stimuli ohne Modalitätswechsel betrachtet wurden ($AV \rightarrow AV$: $F_{1,13} = 77.0$, $p < .01$; $AT \rightarrow AT$: $F_{1,13} = 84.0$, $p < .01$; $VT \rightarrow VT$: $F_{1,13} = 246.2$, $p < .01$).

Entsprechend der Fragestellung der Teilstudie wurden vier Varianten des *race model*-Tests berechnet, (a) unter Verwendung aller Stimuli (A , V , AV , „klassische Variante“), (b) unter Verwendung nur derjenigen Stimuli, denen kein Modalitätswechsel voranging ($A \rightarrow A$, $V \rightarrow V$, $AV \rightarrow AV$), (c) unter Verwendung der Untergruppe der Stimuli mit auditivem Vorgängerreiz ($A \rightarrow A$, $A \rightarrow V$, $A \rightarrow AV$) und (d) unter Verwendung der Untergruppe der Stimuli mit visuellem Vorgängerreiz ($V \rightarrow A$, $V \rightarrow V$, $V \rightarrow AV$). Bei den

Tabelle 2.1: Reaktionszeiten und Modalitätswechselkosten (MWK) in ms

<i>a – Auditiv-visuelle Versuchsbedingung</i>					
Auditive Reize			Visuelle Reize		
Stimulus	Mittelwert	SD	Stimulus	Mittelwert	SD
V—A	348	69	A—V	349	47
A—A	294	43	V—V	315	36
MWK	54		MWK	34	

<i>b – Auditiv-taktile Versuchsbedingung</i>					
Auditive Reize			Taktile Reize		
Stimulus	Mittelwert	SD	Stimulus	Mittelwert	SD
T—A	379	89	A—T	361	64
A—A	310	51	T—T	325	47
MWK	69		MWK	36	

<i>c – Visuell-taktile Versuchsbedingung</i>					
Visuelle Reize			Taktile Reize		
Stimulus	Mittelwert	SD	Stimulus	Mittelwert	SD
T—V	336	61	V—T	349	67
V—V	307	45	T—T	333	51
MWK	29		MWK	16	

Anmerkung.

V—T: Reaktionszeit auf einen taktilen Reiz mit visuellem Vorgängerreiz

Tabelle 2.2: Reaktionszeiten in ms und Redundanzgewinn (RTE)

<i>a – Auditiv-visuelle Versuchsbedingung</i>					
Alle Stimuli			Ohne Modalitätswechsel		
Stimulus	Mittelwert	SD	Stimulus	Mittelwert	SD
A	312	45	A—A	294	43
V	334	38	V—V	315	36
AV	274	38	AV—AV	267	40
RTE	49		RTE	38	

<i>b – Auditiv-taktile Versuchsbedingung</i>					
Alle Stimuli			Ohne Modalitätswechsel		
Stimulus	Mittelwert	SD	Stimulus	Mittelwert	SD
A	330	58	A—A	310	51
T	348	56	T—T	325	47
AT	283	45	AT—AT	275	43
RTE	56		RTE	43	

<i>c – Visuell-taktile Versuchsbedingung</i>					
Alle Stimuli			Ohne Modalitätswechsel		
Stimulus	Mittelwert	SD	Stimulus	Mittelwert	SD
V	318	44	V—V	307	45
T	338	50	T—T	333	51
VT	281	47	VT—VT	281	49
RTE	47		RTE	39	

Anmerkung.

RTE = mittlere Reaktionszeit auf unimodale Reize – Reaktionszeit auf bimodale Reize

anderen Modalitätspaarungen (auditiv-taktil, visuell-taktil) wurde entsprechend verfahren. Die *race model*-Tests sind in den Abbildungen 2.2–2.4 wiedergegeben.

In allen Modalitätspaarungen zeigte sich ein ähnliches Bild: Der klassische *race model*-Test ohne Berücksichtigung der Modalitätswechselkosten (a) lieferte jeweils einen deutlichen Hinweis auf Koaktivierung. Wurden die Modalitätswechselkosten berücksichtigt (b–d), sank das Ausmaß der Koaktivierung, was an der kleineren Anzahl signifikanter *bins* zu erkennen ist. Die Verletzung des *race model* blieb jedoch in allen Bedingungen bestehen.

2.4 Diskussion

In der vorliegenden Teilstudie wurde die Hypothese überprüft, ob der Redundanzgewinn bei Reaktionen auf bimodale Stimuli zumindest teilweise durch Modalitätswechselkosten erklärt werden kann. Da bei bimodalen Reizen immer mindestens eine Stimuluskomponente mit dem Vorgängerreiz übereinstimmt, sollten die Reaktionen von Modalitätswechseln nicht beeinflusst sein. Reaktionen auf unimodale Reize sind hingegen von Modalitätswechseln betroffen und daher langsamer. Es wäre also denkbar, dass die Redundanzgewinne alleine durch Modalitätswechselkosten zustande kommen. In einer Simulation wurde gezeigt, dass dies zu einer Verletzung des *race model* führen kann, obwohl keine Koaktivierung bei der Generierung der Reaktionszeiten angenommen wurde (Abb. 2.1). Zur Lösung dieses Problems wurden modifizierte Varianten des *race model*-Tests vorgeschlagen, bei denen die Modalitätswechselkosten entweder eliminiert wurden, indem nur Reize ohne Modalitätswechsel (d. h. wiederholte Reize) verwendet wurden, oder bei denen der Vorgängerreiz konstant gehalten wurde (z. B. nur Reize, die einem auditiven Stimulus folgen). Da Modalitätswechselkosten v. a. dann anfallen, wenn auf den aktuellen Reiz und auf den Vorgängerreiz reagiert werden muss (Rist & Cohen, 1987), ist diese Korrekturmethode v. a. bei Aufgaben mit Einfachreaktionen und Wahlreaktionen notwendig.

In einer Untersuchung mit Einfachreaktionen auf auditiv-visuelle, auditiv-taktile

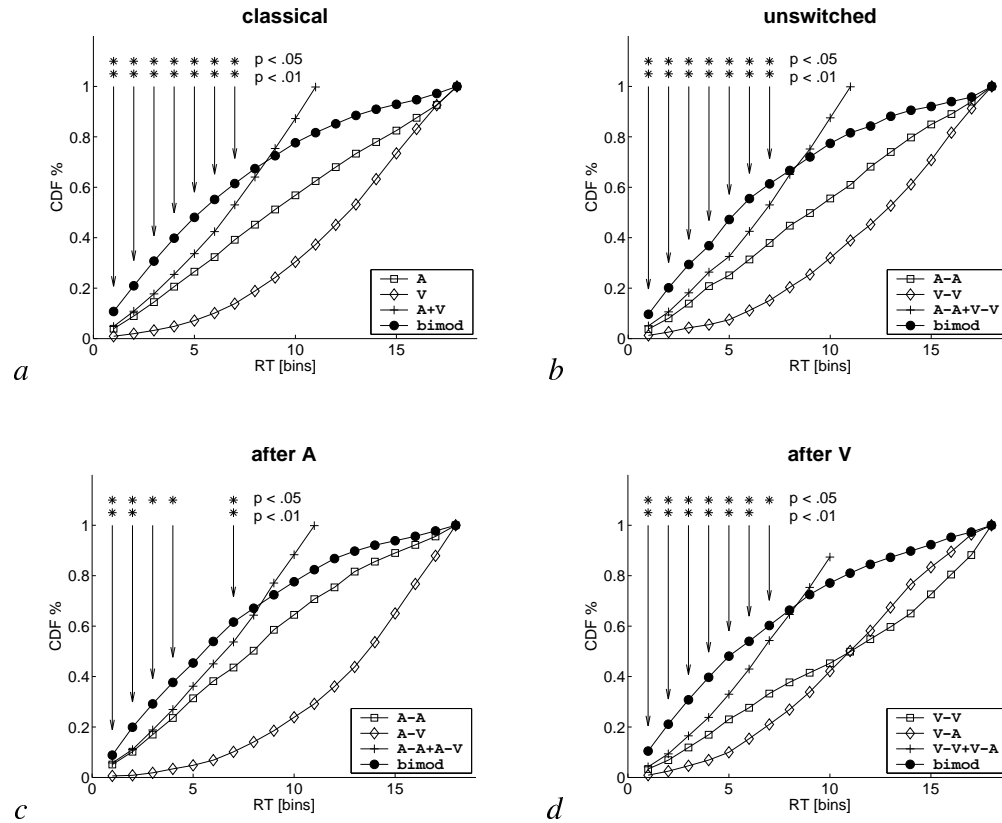


Abbildung 2.2: Race model-Test, auditiv-visuelle Versuchsbedingung. (a) Alle Stimuli wurden verwendet („klassische Variante“), die Modalitätswechselkosten bleiben demnach unberücksichtigt. Es ist eine deutliche Verletzung des *race model* erkennbar. (b) Modifizierte Variante, in der nur Stimuli ohne Modalitätswechsel ausgewertet werden. Es bleibt ein deutlicher Koaktivierungseffekt bestehen. (c/d) Die Verletzung des *race model* bleibt auch bei definiertem Vorgängerreiz erkennbar. Der Unterschied zwischen den Reaktionszeiten auf auditive und visuelle Reize wird in (c) noch verstärkt, weil die ohnehin bereits langsameren Reaktionen auf visuelle Reize zusätzlich durch die Modalitätswechselkosten nach einem auditiven Reiz gebremst werden. Durch diesen Effekt sinkt auch das Ausmaß der Koaktivierung.

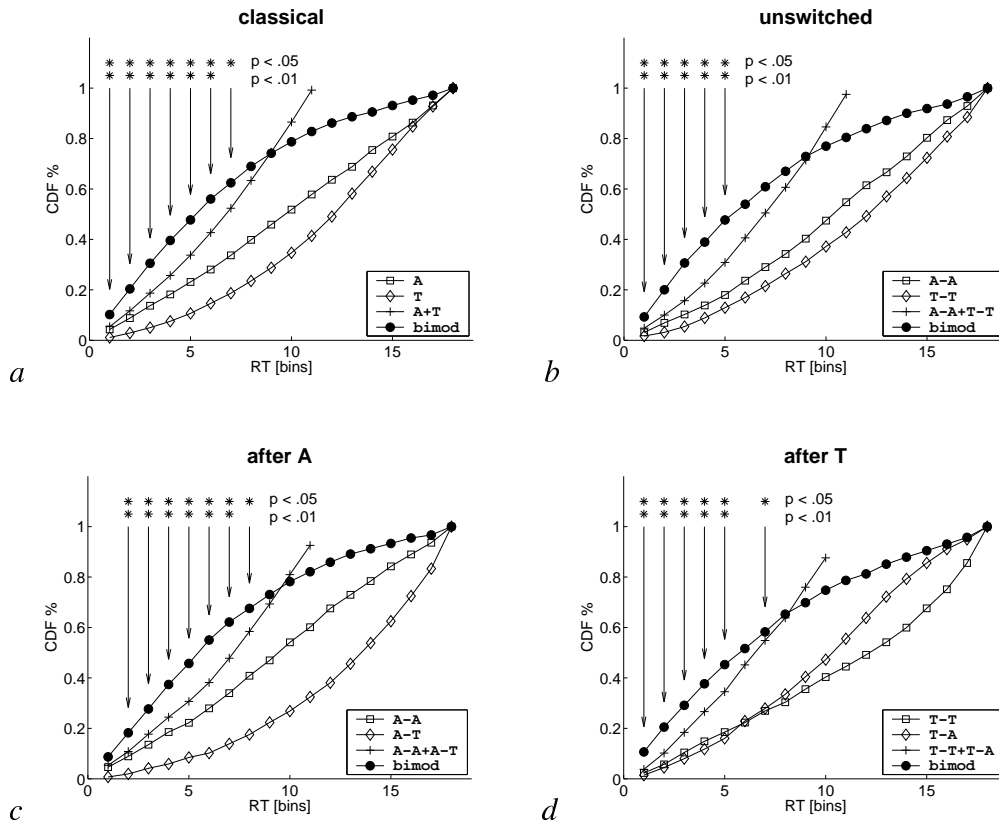


Abbildung 2.3: *Race model*-Test, auditiv-taktile Versuchsbedingung. (a) Alle Stimuli wurden verwendet („klassische Variante“). Es ist eine deutliche Verletzung des *race model* erkennbar, der Test zeigt Koaktivierung an. (b) Modifizierte Variante, in die nur Stimuli ohne Modalitätswechsel eingehen. Es bleibt deutliche Koaktivierung bestehen. (c/d) Die Verletzung des *race model* bleibt auch bei definiertem Vorgängerreiz bestehen, wird aber geringer.

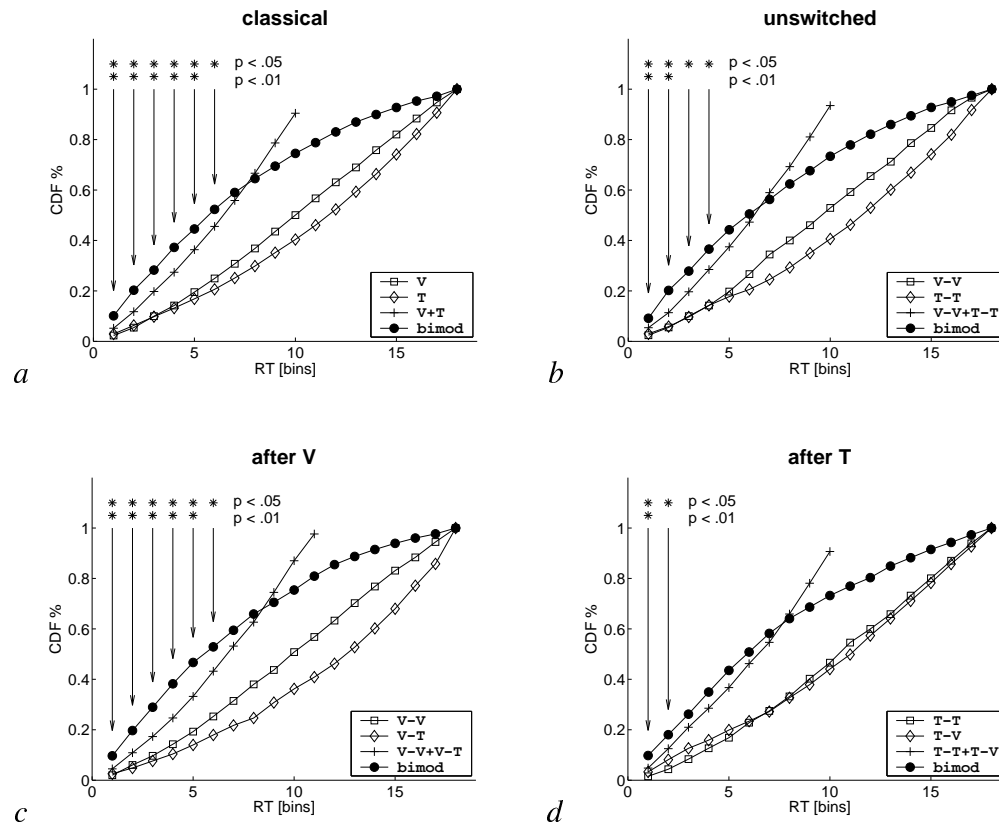


Abbildung 2.4: Race model-Test, visuell-taktile Versuchsbedingung. (a) Alle Stimuli wurden verwendet („klassische Variante“). Es ist eine deutliche Verletzung des *race model* erkennbar, der Test zeigt daher Koaktivierung an. (b) Modifizierte Variante, in die nur Stimuli ohne Modalitätswechsel eingehen. Das Ausmaß der Verletzung des *race model* sinkt hierdurch etwas, trotzdem bleibt deutliche Koaktivierung erkennbar. (c/d) Die Verletzung des *race model* bleibt auch bei definiertem Vorgängerreiz bestehen.

und visuell-taktile unimodale und bimodale Reize wurde jeweils deutliche Koaktivierung beobachtet, wenn die Modalitätswechselkosten unberücksichtigt blieben; der Reaktionszeitgewinn bei den redundanten Reizen war demnach höher als durch das *race model* vorhergesagt. Gleichzeitig wurden deutliche Modalitätswechselkosten beobachtet. Die Annahme, dass der Koaktivierungseffekt zumindest teilweise durch Modalitätswechselkosten erklärt werden kann, konnte bestätigt werden: Durch die Korrektur der Modalitätswechselkosten sanken sowohl der Redundanzgewinn (vgl. Tab. 2.2) als auch das Ausmaß der *race model*-Verletzung (Abb. 2.2–2.4). Trotzdem blieb deutliche Koaktivierung erkennbar, die Reize aus den unterschiedlichen Modalitäten scheinen also an irgendeiner Station der kognitiven Verarbeitung integriert zu werden.

Wie in Tabelle 2.2 ersichtlich, waren auch die Reaktionen auf bimodale Reize etwas schneller (ca. 10 ms, $p < .05$), wenn der bimodale Reiz einem anderen bimodalen Reiz folgte (dieser Effekt wurde allerdings nur in der auditiv-visuellen und in der auditiv-taktilen Versuchsbedingung beobachtet). Dieser Effekt kann innerhalb des *race model* erklärt werden: Beim wiederholten bimodalen Reiz sind beide Stimuluskomponenten voraktiviert, so dass beide Signale schneller verarbeitet werden. Wie bei den simulierten Reaktionszeiten in Abbildung 2.1 ersichtlich (A—AV und AV—AV), führt dieser Effekt auch ohne Koaktivierung zu schnelleren Reaktionen auf wiederholte bimodale Reize. Die Übereinstimmung dieses empirischen Befundes mit den Simulationsergebnissen macht plausibel, dass die Modalitätswechselkosten wie in der Simulation an einer vergleichsweise frühen Station der kognitiven Verarbeitung anfallen, d. h. bevor die Informationen aus den beiden Sinneskanälen integriert werden.

3 Multisensorische Interaktionen in ereigniskorrelierten Potentialen

3.1 Hintergrund

Die Messung von ereigniskorrelierten Potentialen (EKPs, für eine Einführung in die Methode vgl. Coles & Rugg, 1995) liefert Abbilder neuronaler Vorgänge in Form von Potentialveränderungen auf der Kopfoberfläche. Die gemessenen Potentiale spiegeln im Wesentlichen die summierte post-synaptische Aktivität senkrecht zur Kopfoberfläche orientierter Neuronenverbände wider. Sie haben daher eine relativ geringe räumliche Auflösung, eine typische Elektrodenmontage besteht z. B. aus 64 auf der Kopfoberfläche verteilten Elektroden. Gleichwohl ist es möglich, die Potentiale mit hoher zeitlicher Auflösung (z. B. 500 Hz) abzuleiten, so dass man im Intervall zwischen Stimulus und Reaktion eine große Informationsmenge gewinnen kann, bei einer Reaktionszeit von 300 ms entsprechend $64 \text{ (Elektroden)} \times 150 \text{ (Messungen innerhalb 300 ms)}$ Datenpunkte. Hierdurch erhält man wichtige Hinweise über die Art und Weise, wie das Endprodukt „Reaktionszeit“ zustande kommt (Coles et al., 1995).

In dieser Teilstudie wird gezeigt, wie man EKPs zur Untersuchung multisensorischer Integrationsprozesse einsetzen kann. In Untersuchungen multisensorischer Interaktionen mit ereigniskorrelierten Potentialen (EKPs) werden häufig die EKPs auf uni- und bimodale Reize gemessen, um dann das bimodal evozierte Potential (AV) mit der Summe der unimodal evozierten Potentiale (A, V) zu vergleichen. Was übrig bleibt,

wird als multisensorische Interaktion (MSI) bezeichnet:

$$AV - (A + V) = \text{MSI} \quad (3.1)$$

Diese Methode wurde von Barth, Goldberg, Brett und Di (1995) eingeführt. Barth et al. untersuchten auditiv-visuelle Interaktionen mit EEG-Ableitungen auf der Kortexoberfläche von Ratten. Gleichung 3.1 basiert auf folgender Überlegung: Werden die Informationen aus dem auditiven und visuellen System voneinander unabhängig verarbeitet, sollte sich das auditiv-visuell evozierte Potential (AV) nicht von der Summe der auditiv und visuell evozierten Potentiale unterscheiden bzw. sollte die Differenz $AV - (A + V)$ Null ergeben. Multisensorische Interaktionen zwischen den Systemen sollten sich folgerichtig in einem Ergebnis ungleich Null widerspiegeln. Bei EKP-Untersuchungen am Menschen wurden mit dieser Methode Wechselwirkungen zwischen dem auditiven und dem visuellen System (Fort, Delpuech, Pernier & Giard, 2002; Giard & Peronnet, 1999; Molholm et al., 2002), zwischen dem auditiven und taktilen System (Foxe et al., 2000; Okajima, Chino, Takahashi & Kimura, 1995) und zwischen dem visuellen und taktilen System berichtet (Schürmann, Kolev, Menzel & Yordanova, 2002; Okajima et al., 1995). Auffällig ist, dass die Interaktionen häufig bereits zu sehr frühen Zeitpunkten der Stimulusverarbeitung beobachtet wurden, z. B. bereits 40 ms nach Stimulusdarbietung in der Untersuchung von Giard und Peronnet (1999). Die gleiche Subtraktionsmethode wurde auch mit bimodalen Standard-Target-Differenzen ($[AV - S] - [A - S] - [V - S]$, vgl. Schröger & Widmann, 1998), bei Untersuchungen mit Magnetenzephalographie (Gobbelé et al., 2002; Lütkenhöner, Lammertmann, Simões & Hari, 2002; Raij, Uutela & Hari, 2000; Supek et al., 1999), mit funktioneller Magnetresonanztomographie (fMRI, Calvert et al., 1999; Calvert, Campbell & Brammer, 2000; Calvert, Hansen, Iversen & Brammer, 2001; Foxe et al., 2002), bei EEG-Untersuchungen im Frequenzraum (Sakowitz, Schürmann & Başar, 2000; Sakowitz, Quiroga, Schürmann & Başar, 2001) und bei rein visuellen Fragestellungen verwendet (Miniussi et al., 1998; Murray et al., 2001).

Die geschilderte Vorgehensweise ist jedoch in folgendem Punkt problematisch

(Teder-Sälejärvi et al., 2002; Iacobini, Ptito, Weekes & Zaidel, 2000): Da vom auditiv-visuell evozierten Potential zwei andere abgezogen werden (AEP, VEP), erfordert die Subtraktionsmethode streng genommen, dass die EKPs/MEGs/fMRI-Datensätze von A, V und AV keinerlei gemeinsame Aktivität enthalten. Es sind jedoch viele Beispiele für diese gemeinsame Aktivität denkbar, z. B. eine *contingent negative variation* (CNV, Walter, Cooper, Aldridge, McCallum & Winter, 1964), die die Erwartung des nächsten Stimulus widerspiegelt, oder spätere EKP-Komponenten wie z. B. P300, motorische Bereitschaftspotentiale usw. Diese gemeinsame Aktivität (C) ist gleichermaßen in A, V und AV enthalten und wird im Ausdruck $AV - (A + V)$ daher doppelt abgezogen: $AVC - (AC + VC)$. Das Ergebnis dieses Ausdrucks spiegelt damit nicht nur die Wechselwirkung zwischen den Sinnessystemen wider, sondern wird zusätzlich durch $-C$ kontaminiert:

$$AVC - (AC + VC) = MSI - C \quad (3.2)$$

Die CNV stellt vor allem dann ein Problem dar, wenn eine Baseline-Korrektur durchgeführt wird: Die Werte eines normalen EEG-Signals schwanken im Bereich $-50 \mu V \dots 50 \mu V$. Um das Signal digitalisieren zu können, muss es zunächst verstärkt werden, bei ereigniskorrelierten Potentialen werden typischerweise Frequenzen im Bereich 0.1 Hz. . . 100 Hz verstärkt. Die niedrige untere Grenzfrequenz (0.1 Hz) hat allerdings zur Folge, dass Gleichspannungen, die z. B. durch Polarisierungen der Elektroden oder Schwitzen der Versuchsperson entstehen, eine Weile im EEG-Signal sichtbar sind und nur langsam ausklingen: So sind bei einem Hochpassfilter mit einer Grenzfrequenz von 0.1 Hz nach ca. 3 s noch rund 10 % einer konstanten Gleichspannung sichtbar. Um solche Gleichspannungsanteile zu eliminieren, werden bei der Datenauswertung EEG-Segmente nicht nur nach einem Stimulus, sondern bereits z. B. 100 ms vor dem Stimulus ausgeschnitten. Dieser Prästimulus-Abschnitt („Baseline“) wird als Nullpunkt definiert, für jede Elektrode gemittelt und vom Gesamtsegment abgezogen. Dies setzt allerdings voraus, dass im Prästimulus-Abschnitt keine systematische neuronale Aktivität auftritt (Besle, Fort & Giard, 2004). Vor allem wenn die Stimuli in einem

festen Rhythmus präsentiert werden (wie z. B. in Calvert et al., 1999; Fort et al., 2002; Foxe et al., 2002; Giard & Peronnet, 1999; Gobelé et al., 2002; Lütkenhöner et al., 2002; Raij et al., 2000; Schürmann et al., 2002), kann im gemittelten EKP eine CNV beobachtet werden, die die Erwartung eines kommenden Reizes widerspiegelt. Streng genommen ist eine Baseline-Korrektur also unzulässig, wenn eine CNV in den Daten erkennbar wird: Die Subtraktion der durch die CNV bedingten Negativierung führt in diesem Fall zu einer artifiziellen Positivierung im gemittelten EKP.

Wendet man Gleichung 3.1 auf gemittelte auditiv, visuell und bimodal evozierte Potentiale an, wird die artifizielle Positivierung doppelt abgezogen und erscheint dann gemäß Gleichung 3.2 wieder als Negativierung im Subtraktionsterm, was eine scheinbare frühe multisensorische Interaktion mit rampenartigem Verlauf erzeugt. Teder-Sälejärvi et al. (2002) demonstrierten diesen Effekt, indem sie unterschiedliche Intervalle für die Baseline-Korrektur verwendeten: Wurde der Abschnitt $-100 \dots 0$ ms für die Baseline-Korrektur verwendet, zeigte das Differenz-EKP nach Gleichung 3.1 bereits 20 ms nach Stimulusdarbietung multisensorische Interaktionen an. Wurde hingegen der Abschnitt $-100 \dots -50$ ms für die Baseline-Korrektur verwendet, unterschied sich das Differenz-EKP nach Gleichung 3.1 bereits 10 ms nach Stimulusdarbietung signifikant von Null.

Um den Fehler durch die doppelt subtrahierte CNV zu korrigieren, wendeten Teder-Sälejärvi et al. (2002) einen Hochpassfilter auf die gemittelten EKPs an. Durch diese Korrektur verschwanden frühe multisensorische Interaktionen, wodurch eine erste stabile multisensorische Interaktion ca. 160 ms nach Stimulusdarbietung an parietalen Elektroden beobachtet wurde. Die Anwendung eines Hochpassfilters mag im Fall der CNV angemessen sein, obwohl der Filter sicherlich auch andere, A-, V- oder AV-spezifische, Signalkomponenten eliminiert (Fort & Giard, 2004). Wiederum andere gemeinsame EKP-Komponenten (z. B. die P300) werden vom Filter nicht erfasst, so dass der Hochpassfilter allenfalls als „Notlösung“ angesehen werden sollte.

In der vorliegenden Teilstudie wird eine Alternativmethode zur Berechnung auditiv-visueller Interaktionen bei ereigniskorrelierten Potentialen vorgeschlagen. Diese

Methode zeichnet aus, dass zwei EKPs von zwei anderen EKPs subtrahiert werden, wodurch die gemeinsame Aktivität C eliminiert wird. Der neue EKP-Vergleich kann in zwei Schritten hergeleitet werden: In einem ersten Schritt wird Gleichung 3.1 um das EKP-Signal, das durch einen Nullstimulus (NS, also wenn gar kein Reiz dargeboten wird) ausgelöst wird, erweitert:

$$(NS + AV) - (A + V) = MSI \quad (3.3)$$

Dies löst das Problem der gemeinsamen Aktivität allerdings noch nicht, denn der Nullstimulus löst nicht C, sondern eventuell seinerseits spezifische EKP-Aktivität aus (z. B. ein *missing stimulus related potential*, MSRP, Busse & Woldorff, 2003; Simson, Vaughan & Ritter, 1976). Gleichung 3.3 enthält daher eher noch mehr artifizielle Anteile:

$$(NS + AVC) - (AC + VC) = MSI - C + MSRP \quad (3.4)$$

Deswegen werden in einem letzten Schritt die vier beteiligten Stimuli (NS, AV, A, V) um einen taktilen Reiz ergänzt (NS→T, AV→TAV, A→TA, V→TV):

$$(T + TAV) - (TA + TV) = MSI \quad (3.5)$$

Können die Wechselwirkungen zwischen dem auditiven und visuellen System mit diesem Ausdruck bestimmt werden? Die unimodalen Stimulusanteile ($2 \times T$, A und V auf der linken Seite; $2 \times T$, A und V auf der rechten Seite) subtrahieren sich zu Null. Im trimodalen Reiz TAV sind alle drei bisensorischen Wechselwirkungen denkbar: Das auditive System könnte mit dem visuellen System interagieren, das auditive mit dem somatosensorischen, und das visuelle mit dem somatosensorischen System. Die auditiv-taktile Interaktion ist auch im Subtrahenden (TA) enthalten, ebenfalls die visuell-taktile Interaktion (TV), sodass in Gleichung 3.5 die auditiv-visuelle Interaktion isoliert wird (vgl. Tab. 3.1).

Tabelle 3.1: Multisensorische Interaktionen in der neuen $(T + TAV) - (TA + TV)$ und in der alten $AV - (A + V)$ Vergleichsmethode

$(T + TAV) - (TA + TV)$									
Vorzeichen	EKP	C	SEP	AEP	VEP	$T \times A$	$T \times V$	$A \times V$	$T \times A \times V$
+	T	+	+						
+	TAV	+	+	+	+	+	+	+	(+)
-	TA	-	-	-		-			
-	TV	-	-		-		-		
Differenz								+	(+)

$AV - (A + V)$									
Vorzeichen	EKP	C	SEP	AEP	VEP	$T \times A$	$T \times V$	$A \times V$	$T \times A \times V$
+	AV	+		+	+			+	
-	A	-		-					
-	V	-			-				
Differenz		-						+	

Anmerkung.

SEP, AEP, VEP: somatosensorisch, auditiv, visuell evoziertes Potential

Theoretisch wäre auch eine trisensorische Wechselwirkung im trimodalen Reiz TAV denkbar. Welchen Nutzen könnte der Organismus von trisensorischen Interaktionen haben, die über die paarweisen bisensorischen Interaktionen hinausgehen? Die Detektion von schwachen trimodalen Reizen der Außenwelt würde hiervon wenig profitieren: Selbst wenn alle drei Reizkomponenten von sehr schwacher Intensität wären, würde der Sinneseindruck bereits durch bisensorische Wechselwirkungen hinreichend

verstärkt. Eine weitere trisensorische Wechselwirkung wäre hierbei zumindest nicht mehr notwendig. Trisensorische Interaktionen im Ergebnis von Gleichung 3.5 können jedoch nicht ausgeschlossen werden, z. B. beobachteten Wallace et al. (1992) bei ca. 6 % der Zellen im Colliculus superior Reaktionen auf trisensorische Stimuli. Zu Prozessen wie spezifische Antwortverstärkung oder -hemmung (*response enhancement*, *response depression*) auf trimodale Reize liegen noch keine Untersuchungen vor.

In der vorliegenden Teilstudie wurden daher zusätzlich Reaktionszeiten erfasst, um aus ihnen eventuelle Hinweise auf trisensorische Interaktionen zu gewinnen. Hierfür wurde der *race model*-Test (Miller, 1982) für trimodale Koaktivierung erweitert. Die Ergebnisse wurden bereits separat in Kapitel 1 dargestellt: Es ergaben sich keine Hinweise auf spezifisch trisensorische Redundanzgewinne. Das schließt trisensorische Interaktionen auf neuronaler Ebene zwar nicht gänzlich aus, macht sie aber zumindest weniger wahrscheinlich.

3.2 Methode

Stichprobe

19 Versuchspersonen (Studenten, 12 weiblich, 7 männlich, 20–32 Jahre) nahmen freiwillig an der Untersuchung teil. Alle konnten normal hören und ihre Sehfähigkeit war nicht beeinträchtigt bzw. korrigiert. Die Daten von drei weiteren Versuchsteilnehmern konnten nicht mit in die Auswertung aufgenommen werden, da sie zu hohe Alpha-Aktivität zeigten: Selbst im gemittelten EKP waren an einzelnen Elektroden Amplitudenunterschiede von über 2 μ V im Prästimulusabschnitt sichtbar.

Stimuli und Aufgabe

Es wurden uni-, bi- und trisensorische auditive, visuelle und taktile Reize dargeboten („Standardreize“, jeweils 405 Darbietungen). Der auditive Reiz (A) war ein kurzes weißes Rauschen (20 ms, 60 dBA, Lautsprecher 80 cm zentral vor der Vpn), der visu-

elle Reiz (V) war ein Aufblinken (20 ms) von zwei über den Lautsprecher montierten Leuchtdioden (60 mcd). Als taktiler Reiz (T) wurde ein mechanischer Impuls (20 ms) auf den rechten Zeigefinger verwendet, der über einen computergesteuerten Metallstift (Durchmesser 0.5 mm) gegeben wurde. Der taktile Reiz war somit räumlich vom auditiven und visuellen Reiz getrennt. Damit die Vpn das Geräusch des taktilen Stimulators nicht hörten, wurde ihnen ein Kopfhörer aufgesetzt, über den ein leises Rauschen konstant dargeboten wurde. Die Wahrnehmung der auditiven Reize wurde hierdurch nicht beeinträchtigt. Als bimodale Reize wurden alle möglichen Kombinationen der unimodalen Reize (AV, TA, TV) verwendet, der trimodale Reiz war entsprechend ein auditiv-visuell-taktiler Reiz (TAV). Das Intervall zwischen zwei Reizen (ISI) betrug 1300–1700 ms. Zusätzlich wurde ein Nullreiz (O) dargeboten, bei dem nach dem üblichen ISI kein Stimulus erschien, um Hinweise auf Hirnaktivität zu erhalten, die mit *missing stimuli* assoziiert ist (Busse & Woldorff, 2003; Simson et al., 1976). In 10 % der Fälle wurden die Reize doppelt dargeboten (AA, VV, TT, AAVV, TTAA, TTVV, TTAADV, „Zielreize“, jeweils 45 Darbietungen), hierauf sollten die Versuchspersonen per Fußschalter so schnell wie möglich reagieren und dabei keine Fehler machen. Das Experiment war in 15 Blöcke zu jeweils 5 Minuten aufgeteilt. Nach jedem Block erhielt die Vpn Rückmeldung über Auslassungen und Fehlreaktionen. Die Gesamtdauer des Experiments betrug ca. zwei Stunden.

Auswertung der Reaktionszeiten

Die Reaktionszeiten auf die Zielreize wurden mit dem *race model*-Test (Gl. 1.1–1.5, vgl. Kap. 1) ausgewertet.

EEG-Aufnahme und Auswertung

Das EEG wurde an 61 äquidistant angeordneten Elektroden abgeleitet (Abb. 3.1, Impedanz $< 5 \text{ k}\Omega$) und mit 500 Hz digitalisiert. Der linke Mastoid diente als Referenz, die Bandbreite des Verstärkers lag zwischen 0.1 und 100 Hz. Für die Auswertung wurden

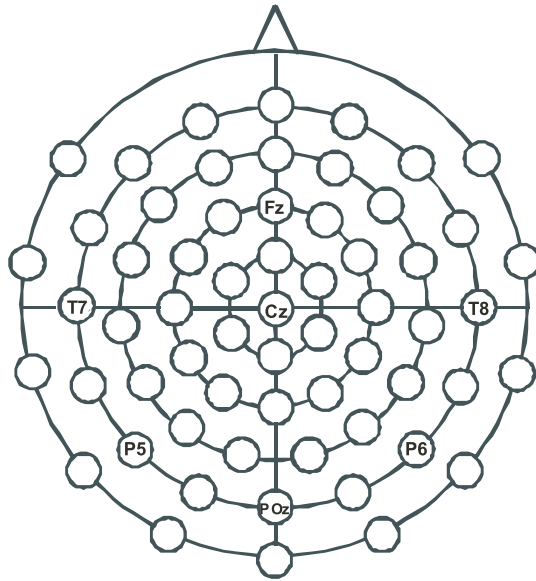


Abbildung 3.1: EEG-Anordnung

nur die Standardreize verwendet, d. h. die Reize, auf die die Versuchspersonen nicht reagieren sollten. Die mittlere Aktivität zwischen 50 und 0 ms vor dem Reiz diente als „Baseline“ und wurde vom Gesamt-Signalverlauf abgezogen. Durchgänge mit Augenblinzeln und Augenbewegungen wurden aus der Auswertung ausgeschlossen. Hierzu wurden zwei EOG-Kanäle (horizontal, vertikal) aufgenommen und alle Segmente mit Potentialdifferenzen über $100 \mu\text{V}$ entfernt. Nach der Mittelung wurden die Daten auf die mittlere Aktivität an beiden Mastoiden nachreferenziert. Multisensorische Interaktionen wurden wie in Gleichung 3.5 beschrieben ausgewertet: $(T + TAV) - (TA + TV)$. Zum Vergleich mit der alten Methode wurde zusätzlich Gleichung 3.1 ausgewertet: $AV - (A + V)$.

3.3 Ergebnisse

Die Auswertung der Reaktionszeiten ist bereits in Kapitel 1 ausführlich dargestellt worden (vgl. Tab 1.1 und Abb. 1.3 und 1.4, S. 31 f) und soll daher an dieser Stelle nur kurz

zusammengefasst werden: Reaktionen auf die trimodalen Reize waren am schnellsten, gefolgt von den bimodalen Reizen, gefolgt von den unimodalen Reizen. Der *race model*-Test zeigte in allen Bedingungen bisensorische Koaktivierung an, der Test für trisensorische Interaktionen hingegen ergab keine Hinweise auf spezifisch trisensorische Koaktivierung (Abb. 1.4d, S. 32).

Die evozierten Potentiale auf die auditiven, visuellen und taktilen Standardreize sind in Abbildung 3.2 wiedergegeben. Abbildung 3.2 zeigt außerdem den EKP-Signalverlauf, wenn kein Stimulus dargeboten wurde (*missing stimulus*). Das auditiv evozierte Potential zeigt einen charakteristischen N1-P2-Komplex über der Kopfmittle (Elektrode Cz). Das visuell evozierte Potential zeigt bilaterale P1-N1-Komplexe an okzipitalen Elektroden. Das taktil evozierte Potential ist über der linken somatosensorischen Rinde beobachtbar (die taktilen Stimuli wurden am rechten Zeigefinger dargeboten). Das EKP auf den Nullreiz war ein langsamer positiver Drift, der v. a. an frontalen Elektroden beobachtet wurde. Eine CNV wurde, im Gegensatz zu Teder-Sälejärvi et al. (2002), nicht beobachtet.

Die multisensorischen Interaktionen nach $(T + TAV) - (TA + TV)$ sind in Abbildung 3.3 wiedergegeben. Die Intervalle, in denen sich der Term für mindestens 10 ms signifikant von Null unterscheidet, sind mit Balken markiert. Eine erste Interaktion ist direkt über der Kopfmittle (Cz) ca. 100 ms nach Stimulusdarbietung zu erkennen. Eine zweite Interaktion ist zwischen 140 und 180 ms sichtbar, mit einer breiten frontotemporalen Verteilung, gefolgt von einer dritten Interaktion um 250 ms, ebenfalls über Cz. Der Vergleich der beiden Methoden, $AV - (A + V)$ und $(T + TAV) - (TA + TV)$, zeigt zumindest innerhalb der ersten 200 ms keine nennenswerten Unterschiede. Später allerdings fällt der Potentialverlauf bei $(T + TAV) - (TA + TV)$ zurück auf Null, wogegen sich bei $AV - (A + V)$ eine Negativierung um 300 ms zeigt.

Die Differenzkurve der beiden Methoden („neu – alt“) ist in Abbildung 3.4 wiedergegeben. In den ersten 200 ms zeigt sie Ähnlichkeiten mit dem EKP auf den Nullstimulus, später wird wieder eine der P300 vergleichbare EEG-Veränderung sichtbar, die beim Nullstimulus nicht beobachtet wurde.

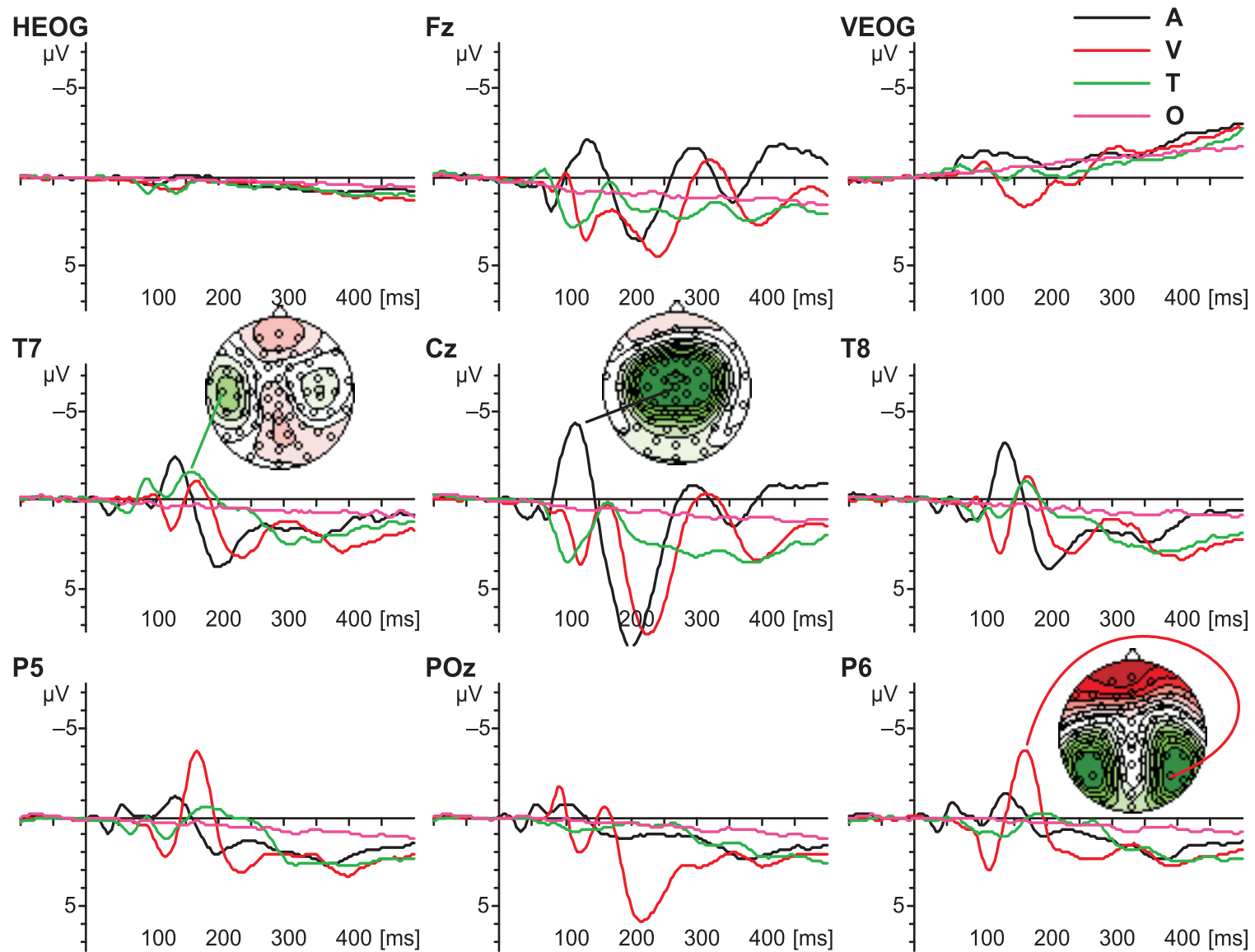


Abbildung 3.2: Ereigniskorrelierte Potentiale auf auditive (A), visuelle (V) und taktile Reize (T) und auf den Nullstimulus (O)

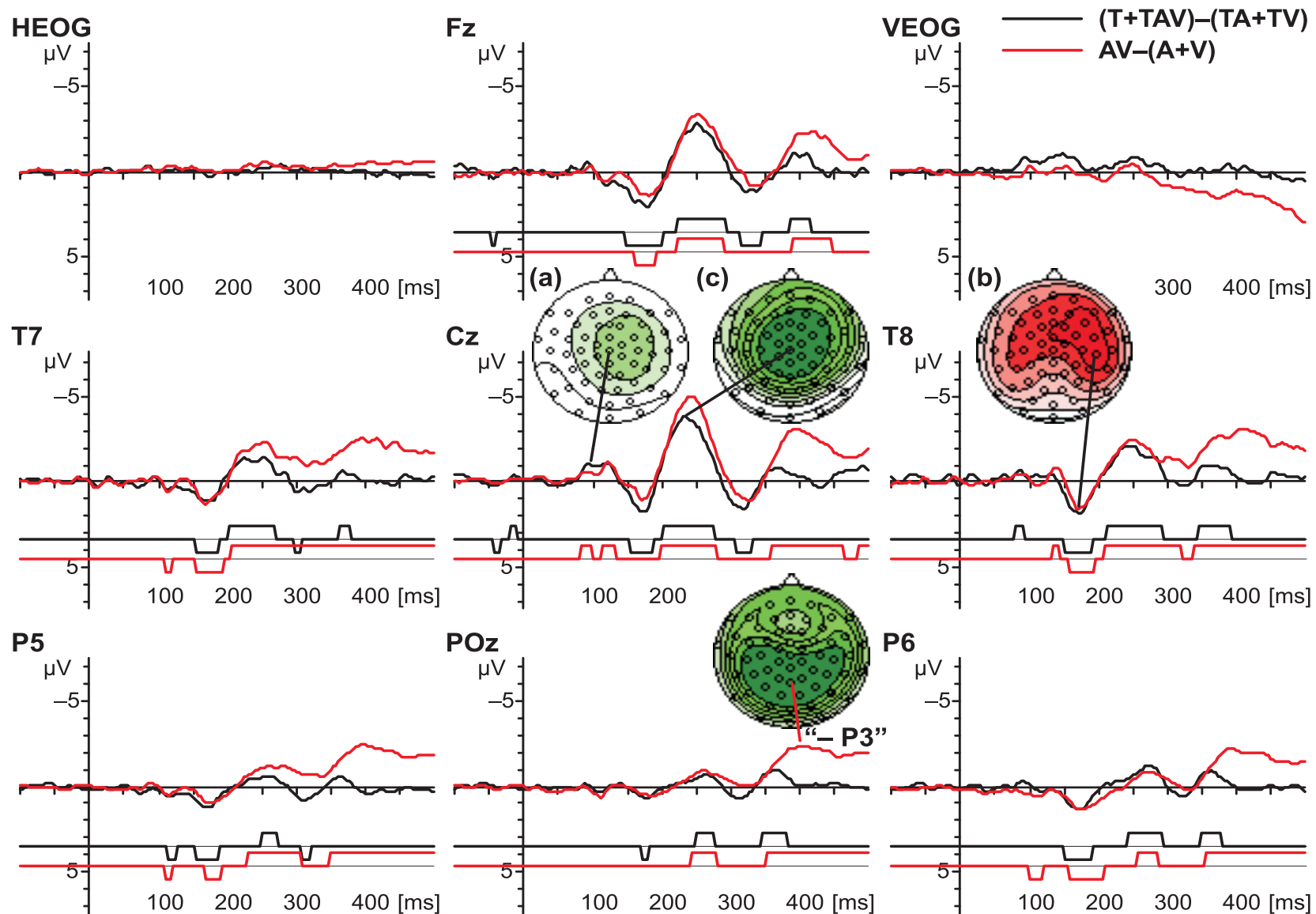


Abbildung 3.3: Interaktionen nach $(T + TAV) - (TA + TV)$ und $AV - (A + V)$. Die rechteckigen Kurven geben die Zeitbereiche an, an denen sich die Differenzen signifikant von Null unterscheiden. Die Interaktion um 100 ms (a) wird nicht an Cz, dafür aber an T8 signifikant.

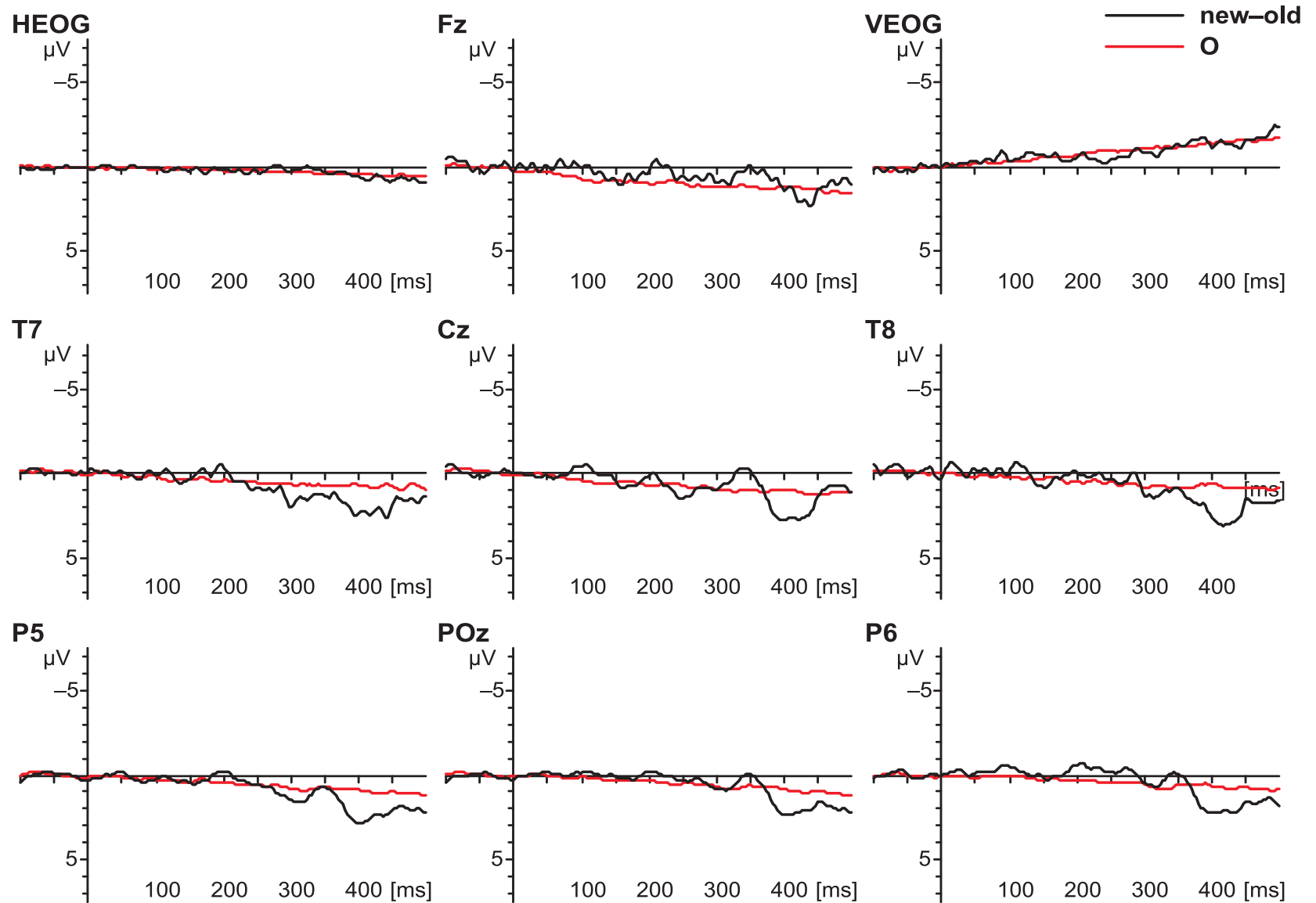


Abbildung 3.4: Die Differenz der beiden Vergleichsmethoden, $(T + TAV) - (TA + TV)$ minus $AV - (A + V)$, ist als schwarze Linie dargestellt. Zum Vergleich das durch den Nullstimulus evozierte Potential (rot).

3.4 Diskussion

Ziel der vorliegenden Teilstudie war es, ein EKP-Maß für Interaktionen des auditiven und visuellen Systems zu entwickeln, in dem die problematische Subtraktion zweier EKPs von einem EKP, wie in $AV - (A + V)$, vermieden werden sollte. Es konnte gezeigt werden, dass die Alternativmethode $(T + TAV) - (TA + TV)$ formal zu $AV - (A + V)$ äquivalent ist, d.h. es werden ebenfalls auditiv-visuelle Interaktionen isoliert (Tab. 3.1). Hinzu kommt, dass der neue Subtraktionsterm zwei Minuenden und zwei Subtrahenden enthält. Damit ist er robust gegenüber gemeinsamer EKP-Aktivität (CNV, P300, usw.).

Mit der neuen Methode konnten Wechselwirkungen des auditiven und visuellen Systems bereits 100 ms nach Präsentation eines Stimulus (a) gezeigt werden, sichtbar über zentralen Ableitorten (Cz). Eine weitere Interaktion (b) wird nach ca. 150 ms erkennbar, mit einer breiten temporo-parietalen Topographie, gefolgt von einer dritten Interaktion (c) um 250 ms, mit wiederum zentraler Topographie.

Die frühe Interaktion (a) repliziert einen ähnlichen Befund bei Teder-Sälejärvi et al. (2002). Diesen werteten die Autoren allerdings als CNV-Artefakt, das nicht vollständig durch den Hochpassfilter eliminiert wurde. Dieser Einwand kann durch die vorliegende Untersuchung ausgeräumt werden, denn in $(T + TAV) - (TA + TV)$ wird eine eventuelle CNV durch die Symmetrie des Differenzterms eliminiert. Auch die zweite Interaktion (b) um 150 ms mit breiter temporo-parietaler Topographie repliziert einen vergleichbaren Befund bei Teder-Sälejärvi et al. (2002, Abb. 6, S. 113) und bei Giard und Peronnet (1999). Giard und Peronnet interpretierten diesen Effekt als Modulation der visuell evozierten N1 im Sinne einer Beeinflussung höherer visueller Zentren durch den auditiven Stimulus. Die dritte Interaktion (c) entspricht in Latenz und Topographie der zweiten Interaktion bei Teder-Sälejärvi et al. (2002). Teder-Sälejärvi et al. betonen allerdings, dass multisensorische Interaktionen im EKP nicht zwingend auf neuronale Erleichterungs- oder Inhibitionsprozesse hinweisen, auch physiologische Refraktäreigenschaften kommen für die Erklärung in Frage: Doppelte neuronale Aktivität muss

sich nicht als doppelte Amplitude im EKP zeigen.

Die Reaktionen auf die „bimodalen Stimuli“ (TAV, es wurde ja ein zusätzlicher taktiler Reiz dargeboten) waren jeweils deutlich schneller als vom *race model* vorhergesagt. Dies zeigte sich sowohl im bimodalen *race model*-Test, in dem die Anteile schneller Reaktionen auf AV mit der Summe der Anteile schneller Reaktionen auf A und V verglichen wurde (Abb. 1.3b, S. 31), als auch im *race model*-Test nach Gleichung 1.4, in dem die Summe der Anteile schneller Reaktionen auf T und TAV mit der Summe der jeweiligen Anteile auf TA und TV verglichen wurden (Abb. 1.4c, S. 32). Es kann also ein Koaktivierungsmodell angenommen werden, d. h. die Informationen aus dem auditiven und visuellen System wurden in irgendeiner Weise integriert. Die Hirnregionen, denen die multisensorischen Interaktionen zugeordnet werden können, kommen hierbei als Kandidaten für die Koaktivierung in Frage (vgl. auch Fort et al., 2002; Molholm et al., 2002). Der Vergleich eines bimodalen Stimulus mit der Summe seiner unimodalen Komponenten liefert allerdings nur globale Erkenntnisse über die multisensorische Integration, denn im einfachen Vergleich $AV - (A + V)$ und in $(T + TAV) - (TA + TV)$ sind mehrere Aspekte konfundiert, die für die multisensorische Integration entscheidend sein könnten: Beide Reizkomponenten werden am gleichen Ort und zur gleichen Zeit dargeboten, sie haben die selbe Reaktionsrelevanz und werden mit der gleichen Aufmerksamkeit von der Versuchspersonen beachtet. Eine kontrollierte Variation dieser Aspekte könnte Aufschluss über spezifischere Mechanismen der Wechselwirkungen von Sehen und Hören geben (vgl. hierzu Kap. 4 und 5).

Formal betrachtet, löst der trimodale Reiz in $(T + TAV) - (TA + TV)$ nicht nur unimodal evozierte Potentiale (SEP, AEP, VEP) und auditiv-visuelle Interaktionen aus, sondern auch auditiv-taktile und visuell-taktile Interaktionen und eventuell auch spezifisch trisensorische Aktivität. Wir haben versucht, diese zu minimieren, indem der taktile Reiz vom Rest des Geschehens räumlich getrennt wurde (vgl. Wallace et al., 1992). Auditiv-taktile und visuell-taktile Interaktionen sind im Subtrahenden $(TA + TV)$ ebenfalls enthalten und sollten daher eliminiert werden. Die trisensorische Interaktion bleibt als möglicher „Störeinfluss“ bestehen. Wie wahrscheinlich sind trisensorische Wechselwirkungen?

selwirkungen, die über paarweise bisensorische Wechselwirkungen hinausgehen? Für die Reizdetektion dürften trisensorische Wechselwirkungen, wie bereits erwähnt, unerheblich sein, denn ein schwacher trimodaler Reiz wird bereits dreifach verstärkt ($A \times V$, $A \times T$, $V \times T$). Somit wäre ein trisensorischer Integrationsmechanismus für die Detektion zumindest nicht mehr notwendig. In Übereinstimmung mit dieser Vermutung erbrachte die Reaktionszeitanalyse nach Gleichung 1.5 keinen Hinweis auf trisensorische Koaktivierung.

Woraus besteht die „gemeinsame Aktivität“? Teder-Sälejärvi et al. (2002) konzentrierten sich auf langsame Potentialverschiebungen, die mit der Erwartung des kommenden Reizes zusammenhängen. Geht man davon aus, dass die durch den auditiven, visuellen und bimodalen Reiz evozierten Potentiale gemeinsame EEG-Aktivität (C) enthalten, dann spiegelt der Ausdruck $AV - (A + V)$ die multisensorische Integration (MSI) wider, minus der gemeinsamen Aktivität (Gl. 3.2): $AVC - (AC + VC) = MSI - C$. Die in der vorliegenden Teilstudie vorgeschlagene neue Vergleichsmethode hat dieses Problem nicht, da C durch die gleiche Anzahl Minuenden und Subtrahenden eliminiert wird: $(TC + TAVC) - (TAC + TVC) = MSI$. Die gemeinsame Aktivität C kann daher geschätzt werden, indem die Ergebnisse der alten Vergleichsmethode von den Ergebnissen der neuen Methode abgezogen werden:

$$\text{neu} - \text{alt} = MSI - (MSI - C) = C \quad (3.6)$$

Das Ergebnis dieser Subtraktion ist in Abbildung 3.4 wiedergegeben. Bis 200 ms nach Stimuluspräsentation entspricht C ungefähr dem vom Nullstimulus evozierten Potential (O): Beide zeigen rampenartige Positivierungen mit frontalem Schwerpunkt, die auf langsame Augenbewegungen zurückgehen könnten. Eine Negativierung (CNV) wurde in der vorliegenden Teilstudie nicht beobachtet, was daran liegen mag, dass die Stimuli in unregelmäßiger Folge dargeboten wurden, um spontane Reaktionen der Versuchspersonen zu verhindern. Später unterscheiden sich C und O: C enthält eine P300-Welle, die bei der Verarbeitung des auditiven, visuellen und bimodalen Reizes gleichermaßen ausgelöst wird.

In der vorliegenden Teilstudie wurde eine neue Methode vorgestellt, mit deren Hilfe man auditiv-visuelle Interaktionen mit ereigniskorrelierten Potentialen untersuchen kann. Die Methode kann ebenso für die Untersuchung auditiv-taktiler und visuell-taktiler Wechselwirkungen verwendet werden, hierfür müssen lediglich die Modalitätsbezeichnungen in Gleichung 3.5 rotiert werden:

$$(V + VAT) - (VA + VT) = MSI(A \times T) \quad (3.7)$$

$$(A + AVT) - (AV + AT) = MSI(V \times T) \quad (3.8)$$

Die neue Methode erscheint auch für die Analyse von MEG-Daten (Lütkenhöner et al., 2002) und funktionellen Kernspindaten geeignet (vgl. z. B. Calvert et al., 2001; Foxe et al., 2002). Auch hier könnte statt $AV - (A + V)$ die neue Vergleichsmethode, $(T + TAV) - (TA + TV)$ verwendet werden.

4 Räumliche Beziehung der Reizkomponenten

4.1 Hintergrund

Multisensorische Neurone in den tieferen Schichten des Colliculus superior antworten auf charakteristische, räumlich organisierte Art und Weise auf Reize der Umgebung (Meredith & Stein, 1987): Spricht ein auditiv-visuelles Neuron z. B. auf visuelle Reize im linken oberen Quadranten an, so reagiert es i. d. R. auch auf auditive Reize von links oben. Fallen beide Komponenten eines bimodalen Reizes in das jeweilige rezeptive Feld, reagiert das Neuron besonders stark (*response enhancement*): Die Antwort auf den bimodalen Reiz übersteigt hierbei die Summe der Antworten auf die unimodalen Reize. Da sich die rezeptiven Felder in den meisten Fällen räumlich überlappen, ist *response enhancement* i. d. R. dann am höchsten, wenn die beiden Komponenten eines bimodalen Reizes am gleichen Ort präsentiert werden. Das umgekehrte Antwortverhalten (*response depression*) zeigt sich, wenn die beiden Reizkomponenten an unterschiedlichen Orten präsentiert werden: In diesem Fall wird die Antwort des Neurons im Vergleich zur Reaktion auf den unimodalen Reiz unterdrückt. Die räumliche Beziehung der beiden Reizkomponenten scheint also zumindest auf der subkortikalen Ebene einen großen Einfluss auf die multisensorische Integration zu haben.

In bisherigen Studien zum Redundanzeffekt wurde die Bedeutung des Raumes kaum untersucht, meist wurden der auditive und der visuelle Teilstimulus jeweils entweder am selben Ort (Giard & Peronnet, 1999; Molholm et al., 2002; Schröger & Widmann, 1998; Teder-Sälejärvi et al., 2002) oder an unterschiedlichen Orten (Diederich

& Colonius, 1987; Giray & Ulrich, 1993; Hershenson, 1962; Miller, 1982) dargeboten. Eine systematische Manipulation fand mit zwei Ausnahmen (Forster et al., 2002; Teder-Sälejärvi, Russo, McDonald & Hillyard, in press) nicht statt bzw. die räumlich kongruenten und räumlich inkongruenten Bedingungen wurden nicht verglichen (Murray et al., in press). Falls die Integrationsmechanismen beim Redundanzeffekt dem gleichen Prinzip folgen wie die Neurone im Colliculus superior (Stein, 1998), sollten sich die Reaktionszeiten auf räumlich kongruente bimodale Reize (d. h. visuelle und auditive Reize am gleichen Ort) und auf räumlich inkongruente Reize (d. h. visuelle und auditive Reize an unterschiedlichen Orten) stark unterscheiden: Bei räumlich kongruenten Reizen sollten deutliche Redundanzgewinne durch die bimodale Stimulation beobachtet werden und die Reaktionszeitverteilung auf ein Koaktivierungsmodell deuten (vgl. Abschnitt 0.2, S. 7). Bei räumlich inkongruenten Reizen sollte die multisensorische Integration ausbleiben, in diesem Fall wären lediglich Redundanzgewinne nach dem *race model* zu erwarten. In jedem Fall sollten die Reaktionen auf räumlich kongruente Reize schneller sein als auf räumlich inkongruente Reize.

Harrington und Peck (1998) konnten diesen Effekt für zielgerichtete Sakkaden zeigen: Sakkadische Reaktionen auf auditiv-visuelle Reize wurden langsamer, wenn der Abstand zwischen dem auditiven und dem visuellen Reiz wuchs, ab ca. 20° konnten nur noch Gewinne nach dem *race model* verzeichnet werden. Hughes et al. (1994) hingegen fanden bei manuellen Einfachreaktionen keinen Hinweis darauf, dass die multisensorische Integration von der räumlichen Kongruenz der Stimuli abhängig ist. Hughes et al. hatten allerdings nur drei Versuchspersonen untersucht und die zeitliche Auflösung der Reaktionstaste lag bei 5 ms, was die Detektion von kleineren Reaktionszeitunterschieden erschwerte. Einen deutlichen Hinweis auf eine effizientere Verarbeitung räumlich kongruenter Stimuli erbrachte die Untersuchung von Frassinetti, Bolognini und Làdavas (2002): Frassinetti et al. boten visuelle und auditive Stimuli mit unterschiedlichem räumlichen und zeitlichen Abstand dar. Die Aufgabe der Versuchsperson bestand darin, auf die schwer zu detektierenden visuellen Stimuli zu reagieren. Der zusätzliche auditive Stimulus führte zu einer besseren Detektionsleistung

(d'), wenn er gleichzeitig und am gleichen Ort wie der visuelle Stimulus dargeboten wurde. Wurde der auditive Reiz an einer anderen Position oder zeitlich versetzt (500 ms früher) präsentiert, erhöhte sich allenfalls die Reaktionsbereitschaft der Versuchspersonen, d. h. sie reagierten häufiger falsch (vgl. auch McDonald et al., 2000). Frassinetti, Pavani und Làdavas (2002) berichten ebenfalls, dass Neglectpatienten räumlich kongruente bimodale Stimuli im vernachlässigten Halbfeld besser entdecken als räumlich inkongruente bimodale Stimuli.

Die Aufgabe des Colliculus superior scheint hauptsächlich darin zu liegen, Objekte der Umwelt schnell zu identifizieren und gegebenenfalls Orientierungsreaktionen auszulösen (Stein & Meredith, 1993). Entsprechend wichtig ist die räumliche Beziehung auf dieser Ebene, da Orientierungsreaktionen auf Objekte hin gerichtet sind, die üblicherweise räumlich kongruente Reizinformationen aussenden. Eine eher untergeordnete Rolle scheint die Bedeutung der Stimuli bzw. der Stimuluskomponenten zu spielen: Diese ergibt sich erst aus der späteren Analyse auf kortikaler Ebene (vgl. z. B. Beauchamp, 2004).

Was bedeutet dies für die multisensorische Integration bei redundanten auditiv-visuellen Reizen? Zum einen sollten bimodale Reize, die am selben Ort dargeboten werden, grundsätzlich effizienter verarbeitet werden. Zum anderen sollten Bedeutungsaspekte an späterer Stelle wirksam werden, z. B. als langsamere Reaktionen bei Bedeutungskonflikten (wenn der eine Teilstimulus eine Reaktion erfordert und der andere nicht), oder als Gewinne bei kongruenter Reizinformation (z. B. bei redundanten Reizen). Wenn die beiden Aspekte (räumliche Beziehung, Bedeutung) unterschiedlichen Verarbeitungsstufen zugeordnet werden können, sollte gemäß der additiven Faktorenlogik auch keine Wechselwirkung zwischen den Reaktionszeiteffekten beobachtbar sein, die auf räumliche und bedeutungsmäßige experimentelle Manipulationen zurückgehen (Sternberg, 1969). Auch dies wurde in der vorliegenden Teilstudie untersucht.

Hierfür wurde das klassische Versuchsdesign beim Redundanzeffekt, bei dem zwei Stimuli mit der gleichen „Bedeutung“ (= Reaktionsrelevanz, per Tastendruck reagieren), entweder allein oder kombiniert dargeboten werden, erweitert: Zusätzlich

Tabelle 4.1: Die verwendeten Stimuli

<i>a – Standardreize (uni-/bimodal)</i>			<i>c – Auditiver Standard/vis. Zielreiz</i>		
Bezeichnung	links	rechts	Bezeichnung	links	rechts
S1	A				
S2		A			
S3	V				
S4		V			
S5	AV		C1	AVV	
S6		AV	C2		AVV
S7	A	V	C3	A	VV
S8	V	A	C4	VV	A
<i>b – Zielreize (uni-/bimodal)</i>			<i>d – Auditiver Zielreiz/vis. Standard</i>		
Bezeichnung	links	rechts	Bezeichnung	links	rechts
T1	AA				
T2		AA			
T3	VV				
T4		VV			
T5	AAVV		C5	AAV	
T6		AAVV	C6		AAV
T7	AA	VV	C7	AA	V
T8	VV	AA	C8	V	AA

Anmerkung.

A: auditiver Standardreiz, V: visueller Standardreiz, AA: auditiver Zielreiz, VV: visueller Zielreiz

zu den Reizen, auf die reagiert werden sollte (doppelt dargebotene Reize, AA, VV, AAVV), wurden Reize präsentiert, auf die die Person nicht reagieren sollte („nicht-kritische Reize“, A, V, AV). Kritische und nicht-kritische Reize wurden auch gemeinsam dargeboten (AAV, AVV). Auch auf diese mussten die Versuchspersonen reagieren. Wie oben erwähnt, wurden die beiden Stimuluskomponenten eines bimodalen Reizes entweder am gleichen Ort (beide links oder beide rechts) oder gegenüber (z. B. der auditive Reiz links, der visuelle rechts) dargeboten. Hieraus ergeben sich die in Tabelle 4.1 aufgelisteten Stimuli.

Es wurde angenommen, dass Reaktionen auf räumlich kongruente redundante Reize (AAVV links, AAVV rechts) schneller sind als Reaktionen auf räumlich inkongruente Reize (AA links, VV rechts und umgekehrt). Dieser Effekt sollte unabhängig von der Reaktionsrelevanz der Reize wirksam werden (Beauchamp, 2004) und daher auch in den Versuchsbedingungen sichtbar werden, bei denen ein kritischer Reiz in der einen Modalität mit einem nicht-kritischen Reiz in der anderen Modalität präsentiert wird (C1...C8, AVV/AAV).

Zusätzlich wurden ereigniskorrelierte Potentiale (EKPs) gemessen. Das Hauptinteresse galt auch hier der Bedeutung der räumlichen Beziehung: Gibt es Hinweise auf eine unterschiedliche kortikale Verarbeitung räumlich kongruenter und räumlich inkongruenter bimodaler Stimuli? Tabelle 4.2 zeigt den dazugehörigen EKP-Vergleich. Effekte der physikalischen Stimulation werden in diesem Vergleich eliminiert, denn die Summe der räumlich kongruenten Stimuli ($S5 + S6$, AV links + AV rechts) entspricht der Summe der räumlich inkongruenten Stimuli ($S7 + S8$, A links/V rechts + V links/A rechts). Hat die räumliche Beziehung keinen Einfluss auf die Verarbeitung der bimodalen Reize, müsste der Vergleich der EKPs $(S5 + S6) - (S7 + S8)$ entsprechend Null ergeben. Hat die räumliche Beziehung einen Einfluss auf die Verarbeitung der bimodalen Reize, müsste sich dies in einem Ergebnis ungleich Null widerspiegeln. Da zudem im Differenzterm zwei EKPs von zwei anderen abgezogen werden, entspricht der Vergleich auch der in Kapitel 3 erhobenen Forderung, symmetrische EKP-Differenzen zu verwenden, d. h. Differenzen mit der gleichen Anzahl Minuenden und Subtrahen-

den (für ein vergleichbares Vorgehen mit semantisch kongruenten und inkongruenten Stimuli vgl. Belardinelli et al., 2004; Klucharev, Möttönen & Sams, 2003).

Mit dem in Tabelle 4.2 dargestellten EKP-Vergleich $(S5 + S6) - (S7 + S8)$ kann man allerdings nur eine allgemeine Aussage über die Bedeutung der räumlichen Kongruenz oder Inkongruenz machen: Unterscheidet sich die Summe der EKPs auf die räumlich kongruenten Reize ($S5 + S6$) von der Summe der EKPs auf die räumlich inkongruenten Reize ($S7 + S8$), weiß man lediglich, dass das Gehirn räumlich kongruente Reize in irgendeiner Weise anders verarbeitet als räumlich inkongruente Reize und wann diese unterschiedliche Verarbeitung einsetzt. Der Vergleich in Tabelle 4.2 kann nicht beantworten, ob ein beobachteter Effekt nun Folge der räumlichen Kongruenz ist, also spezifisch von S5 und S6 ausgelöst wird, oder ob er Folge der räumlichen Inkongruenz ist, also spezifisch von S7 und S8 ausgelöst wird. Zudem werden im Minuenden die EKPs auf gegenüberliegende Stimuli (S5: AV links, S6: AV rechts) addiert und damit „in einen Topf geworfen“. Dasselbe gilt für den Subtrahenden (S7: A links/V rechts, S8: V links/A rechts). Angenommen, S5 und S6 lösten jeweils spezifische, z. B. kontralateral lokalisierbare EEG-Komponenten aus. Im Ergebnis von

Tabelle 4.2: EKP-Vergleich für den räumlichen Kongruenzeffekt

	Stimulus	
	links	rechts
Minuenden		
S5	AV	
S6	AV	
Subtrahenden		
S7	A	V
S8	V	A

$(S5 + S6) - (S7 + S8)$ würden sich beide Komponenten überlagern und wären somit als bilaterale EEG-Veränderung erkennbar. Wünschenswert wären daher lateralisierte EKP-Vergleiche, die den Einfluss von S5 und S6 separat sichtbar machen.

Dies können die EKP-Vergleiche in Tabelle 4.3 leisten. Tabelle 4.3 zeigt ebenfalls Differenzen mit zwei Minuenden und zwei Subtrahenden, deren physikalische Stimulation Null ergibt: Im Minuend wird jeweils das EKP auf einen räumlich kongruenten Reiz mit dem EKP auf einen unimodalen Reiz summiert. Im Subtrahend wird entsprechend das EKP auf einen räumlich inkongruenten Reiz mit dem EKP auf einen unimodalen Reiz summiert. Die Vergleiche in Tabelle 4.3a und 4.3c untersuchen auf diese Weise den Einfluss von S5, dem räumlich kongruenten Reiz auf der linken Seite. Die Vergleiche in Tabelle 4.3b und 4.3d untersuchen entsprechend den Einfluss von S6, dem räumlich kongruenten Reiz auf der rechten Seite. Mit Tabelle 4.3 lässt sich damit eine Aussage über die Lateralisierung eines evtl. beobachteten räumlichen Kongruenzeffekts treffen.

Noch nicht beantwortet ist hierbei die Frage, ob ein eventuell beobachteter Effekt nun auf die räumliche Kongruenz der beiden Reizkomponenten in S5 bzw. S6 zurückgeht, oder ob er vielmehr Folge der räumlichen Inkongruenz in S7 bzw. S8 ist. Allerdings bieten die vier Vergleiche in Tabelle 4.3 auch hierauf einen Hinweis: In 4.3a und 4.3c wird jeweils der Einfluss des räumlich kongruenten Reizes auf der linken Seite (S5) untersucht. Geht ein beobachteter Effekt auf die räumliche Kongruenz zurück, sollten die Vergleiche in Tabelle 4.3a und 4.3c deshalb gleiche Ergebnisse liefern. Entsprechendes gilt für die Vergleiche in Tabelle 4.3b und 4.3d, in denen der Einfluss des räumlich kongruenten Reizes auf der rechten Seite (S6) untersucht wird. Der Schwerpunkt dieses Effekts läge mit hoher Wahrscheinlichkeit kontralateral zum räumlich kongruenten Stimulus, denn die Projektionen des visuellen Systems enden in der kontralateralen Hemisphäre. Geht der Effekt hingegen auf die räumliche Inkongruenz zurück, sollten 4.3a und 4.3d gleiche Ergebnisse liefern, denn beide Vergleiche haben den räumlich inkongruenten Reiz S8 (A rechts/V links) im Subtrahenden. Entsprechendes gilt für die Vergleiche in Tabelle 4.3b und 4.3c, bei denen jeweils S7

Tabelle 4.3: Seitenspezifische EKP-Vergleiche

<i>a – AV links</i>			<i>b – AV rechts</i>		
	Stimulus			Stimulus	
	links	rechts		links	rechts
Minuenden			Minuenden		
S5	AV		S6		AV
S2		A	S1	A	
Subtrahenden			Subtrahenden		
S8	V	A	S7	A	V
S1	A		S2		A
<i>c – AV links</i>			<i>d – AV rechts</i>		
	Stimulus			Stimulus	
	links	rechts		links	rechts
Minuenden			Minuenden		
S5	AV		S6		AV
S4		V	S3	V	
Subtrahenden			Subtrahenden		
S7	A	V	S8	V	A
S3	V		S4		V

(A links/V rechts) im Subtrahenden steht: Geht der Effekt auf die Inkongruenz zurück, müssten 4.3b und 4.3c die gleichen Ergebnisse liefern.

- räumlicher Kongruenzeffekt: $4.3a = 4.3c$ und $4.3b = 4.3d$
- räumlicher Inkongruenzeffekt: $4.3a = 4.3d$ und $4.3b = 4.3c$

Die geschilderten Fragestellungen wurden in einem Redundanzexperiment mit auditiven, visuellen und bimodalen Standard- und Targetreizen an zwei Positionen (30° links und rechts vor der Versuchsperson) untersucht. Die bimodalen Reize wurden entweder am gleichen Ort oder an unterschiedlichen Orten dargeboten (Tab. 4.1 listet alle verwendeten Stimuli auf).

4.2 Methode

Stichprobe

Am Experiment nahmen 15 Versuchspersonen teil (20–31 Jahre, 6 männlich, Studenten der Philipps-Universität). Die Daten von 12 Versuchsteilnehmern konnten verwendet werden, die Daten der übrigen drei Versuchspersonen hatten ein zu geringes Signal-Rausch-Verhältnis (mehr als $1 \mu V$ im gemittelten Prästimulus-Abschnitt bei drei benachbarten Elektroden).

Stimuli und Aufgabe

Das Experiment war ein Oddball-Experiment mit 70 % Standardreizen, auf die die Versuchsperson nicht reagieren sollte (vgl. Tab. 4.1a, S1...S8) und 30 % Zielreizen, auf die sie reagieren sollte. Der auditive Standardreiz war weißes Rauschen (200 ms, 60 dBA), das an einem von zwei Lautsprechern (30° von links oder von rechts) aus ca. 1 m Abstand dargeboten wurde. Als visueller Standardreiz diente ein Aufleuchten von vier roten LEDs (200 ms), die in den Lautsprecher eingebaut waren. Auditive

Zielreize waren doppelt präsentierte kurze Impulse von weißem Rauschen (2×70 ms mit 60 ms Pause), visuelle Zielreize waren doppelt präsentierte LED-Signale (gleiches Timing). Die 30 % Zielreize verteilen sich auf die drei übrigen Abschnitte in Tabelle 4.1b–d (T1...T8, C1...C8, unimodale und redundante Zielreize, Kombinationen aus Standard- und Zielreizen). Die Versuchsteilnehmer wurden gebeten, auf jeden Zielreiz zu reagieren, egal, ob er allein, gemeinsam mit einem Standardreiz oder mit einem anderen Zielreiz (redundante Reize) präsentiert wurde. Bimodale Reize wurden, wie in Tabelle 4.1 ersichtlich, entweder am gleichen Ort (räumlich kongruente Reize) oder an unterschiedlichen Orten dargeboten (räumlich inkongruente Reize). Diese Variation wurde in allen Relevanzbedingungen (nicht-kritische Reize, Kombinationsreize, redundante Reize) realisiert.

Die Versuchsteilnehmer legten ihr Kinn auf eine bequeme Kinnstütze und schauten während des gesamten Versuchs auf ein Fixationskreuz in der Mitte zwischen den beiden Lautsprechern. Nach einem Stimulus hatten sie 1000 ms Zeit zu reagieren, nach einem zufälligen Intervall von 1800–2300 ms nach der Reaktion wurde der nächste Reiz dargeboten. Jeder Standardreiz wurde 430 mal dargeboten, jeder Zielreiz 83 mal, so dass das Gesamtexperiment, inklusive Pausen mit variabler Länge, etwa zweieinhalb Stunden dauerte.

Datenauswertung

Die Reaktionszeiten auf die Zielreize wurden mit einer Varianzanalyse (16 Stufen für die verschiedenen Zielreizbedingungen T1...T8 und C1...C8) ausgewertet, bei der folgende Kontraste definiert wurden: Zum einen wurden unimodale und bimodale Reize verglichen (T1...T4 vs. T5...T8 und C1...C8, vgl. Tab. 4.1, zum anderen wurden die Reaktionszeiten auf die kombinierten Standard-Target-Reize (C1...C8) mit den Reaktionszeiten auf die redundanten Reize (T5...T8) verglichen. Innerhalb der redundanten Reize und der Standard-Target-Kombinationen wurde schließlich überprüft, ob die Reaktionen auf räumlich kongruente Stimuli schneller waren als auf räumlich in-

kongruenten Stimuli (T5/T6 vs. T7/T8, C1/C2 vs. C3/C4 und C5/C6 vs. C7/C8).

Die Redundanzgewinne bei bimodalen Zielreizen wurden mit *race model*-Tests überprüft, z. B. wurde die kumulierte Häufigkeitsverteilung von T7 (auditives Target links, visuelles Target rechts) mit der Summe der kumulierten Häufigkeitsverteilungen von T1 (auditives Target links) und T4 (visuelles Target rechts) verglichen. Es wurde angenommen, dass Koaktivierung nur bei den räumlich kongruenten redundanten Reizen beobachtet werden kann. Die kumulierten Reaktionszeitverteilungen wurden wie bei Corballis (2002) für jede Versuchsperson getrennt gebildet. Das Vorgehen ist in der Einleitung (S. 7 f) detailliert beschrieben.

Der Vergleich der Reaktionszeiten auf unimodale Reize mit den Reaktionszeiten auf bimodale Reize kann Hinweise geben, ob Redundanzgewinne und Koaktivierungseffekte an irgendeiner Station der kognitiven Verarbeitung anfallen. Denkbar wäre z. B., dass (a) allein die höhere Stimulusenergie der bimodalen Reize zu einer effizienteren Verarbeitung führt, ohne dass die Information des zweiten Stimulus hierfür verwendet wird (vgl. z. B. Bernstein et al., 1969; Bernstein, 1970). Außerdem könnte die Versuchsperson (b) von der redundanten Information im doppelten Zielreiz profitieren (A. Cohen & Shoup, 1997). Der Beitrag von (a) kann geschätzt werden, indem unimodale Zielreize (T1...T4, AA, VV) mit bimodalen nicht-redundanten Reizen verglichen werden, also Kombinationen aus einem Standard- und einem Zielreiz (C1...C8, AAV, AVV).

Der Beitrag von (b) kann geschätzt werden, indem nicht-redundante bimodale Reize (C1...C8) mit redundanten Zielreizen (T5...T8, AAVV) verglichen werden. Hierfür wurde ein zweiter *race model*-Test für die redundanten Reize gerechnet, bei dem die kumulierten Reaktionszeitverteilungen auf die redundanten Reize mit denjenigen der entsprechenden nicht-redundanten Reizen verglichen wurden (vgl. z. B. Feintuch & Cohen, 2002), z. B. T7 (auditives Target links, visuelles Target rechts) mit C3 (auditiver Standard links, visuelles Target rechts) und C7 (auditives Target links, visueller Standard rechts).

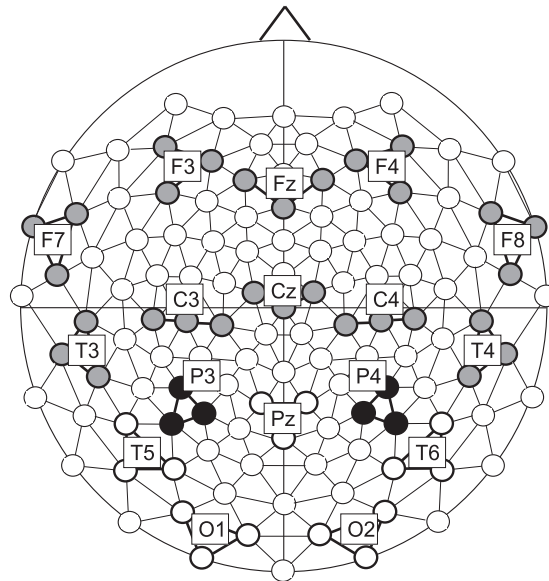


Abbildung 4.1: Elektrodenanordnung und Cluster

EEG-Aufnahme

Das EEG wurde an 124 äquidistant angeordneten Elektroden mit 500 Hz (Bandpass 0.1...100 Hz) abgeleitet. Der rechte Mastoid diente als Referenz, die Daten wurden dann offline auf die mittlere Aktivität der beiden Mastoiden umreferenziert. Die hohe Anzahl der Elektroden wurde reduziert, indem 17 Elektrodentripel gebildet wurden (Abb. 4.1). Zusätzlich wurden das horizontale Elektrookulogramm mit zwei links und rechts neben den Augen angebrachten Elektroden und das vertikale Elektrookulogramm mit einer unter dem rechten Auge angebrachten Elektrode abgeleitet. Segmente mit okularer Aktivität von über $50 \mu\text{V}$ innerhalb des Zeitraums von 100 ms vor und 400 ms nach Stimulusdarbietung wurden entfernt.

EEG-Auswertung

Für die EEG-Auswertung wurden nur die EKPs auf die Standardreize verwendet. Die gemittelten EKPs wurden gemäß Tabelle 4.2 auf multisensorische Interaktionen unter-

sucht: In $(S5 + S6) - (S7 + S8)$ wird der Einfluss der räumlichen Beziehung untersucht, indem die EKPs auf die räumlich kongruenten bimodalen Stimuli (S5: AV links, S6: AV rechts) mit den EKPs auf die beiden räumlich inkongruenten bimodalen Stimuli (S7: A links/V rechts, S8: V links/A rechts) verglichen werden.

Wie bereits erwähnt, liefert die Differenz in Tabelle 4.2 nur einen allgemeinen Hinweis auf die Bedeutung der räumlichen Beziehung für die Verarbeitung bimodaler Reize. Spezifischere Informationen über die Natur des Kongruenzeffekts (Kongruenz oder Inkongruenz, Lateralisierung) liefern die „asymmetrischen“ EKP-Differenzen, die in Tabelle 4.3a–d skizziert sind:

- (a) $(S5 + S2) - (S8 + S1)$: In diesem Vergleich wird der Einfluss eines räumlich kongruenten Reizes auf der linken Seite (S5, AV links) auf die multisensorische Verarbeitung untersucht (vgl. Tab. 4.3a).
- (b) $(S6 + S1) - (S7 + S2)$: In diesem Vergleich wird der Einfluss eines räumlich kongruenten Reizes auf der rechten Seite (S6, AV rechts) auf die multisensorische Verarbeitung untersucht (vgl. Tab. 4.3b).
- (c) $(S5 + S4) - (S7 + S3)$: In diesem Vergleich wird wiederum der Einfluss von S5, des räumlich kongruenten Reizes auf der linken Seite untersucht (vgl. Tab. 4.3c). Im Gegensatz zu Ausdruck (a) steht im Subtrahenden nicht das EKP auf S8 (V links/A rechts), sondern das EKP auf S7 (A links/V rechts). Liefern die Vergleiche in (a) und (c) dasselbe Ergebnis, weist dies auf einen spezifischen Beitrag von S5 hin, der unabhängig vom räumlich inkongruenten Vergleichsreiz (S7/S8) auftritt.
- (d) $(S6 + S3) - (S8 + S4)$: In diesem Vergleich wird wiederum der Einfluss von S6 und damit des räumlich kongruenten Reizes auf der rechten Seite, untersucht (vgl. Tab. 4.3d). Wieder ist von besonderem Interesse, ob (b) und (d) die gleichen Resultate liefern.

4 Räumliche Beziehung der Reizkomponenten

Alle Differenzen wurden innerhalb von Varianzanalysen berechnet, in der Minuend und Subtrahend jeweils eine Stufe des Faktors *räumliche Beziehung* darstellen. Bei der Signifikanzüberprüfung wurden nur Ergebnisse akzeptiert, die über mindestens 10 ms signifikant blieben (vgl. z. B. Teder-Sälejärvi et al., 2002). Die Topographie des räumlichen Kongruenzeffekts wurde untersucht, indem ein zweiter Faktor *Elektrode* eingeführt wurde, der die 17 Elektrodentripel (Abb. 4.1) repräsentierte. Die Lokalisation wurde dann anhand von drei Kontrasten codiert, (a) frontal gegenüber posterior, (b) innerhalb der posterioren Elektroden: P3/P4 gegenüber der Umgebung, und (c) P3 gegenüber P4.

Die Lateralisierung des Effekts wurde in vier separaten Varianzanalysen untersucht, wobei jede Analyse einem Vergleich in Tabelle 4.3 entspricht. Wiederum stellten Minuend und Subtrahend in Tabelle 4.3a–d jeweils eine Stufe des Faktors *räumliche Beziehung* dar, wobei im Signifikanztest die Wechselwirkung mit *Elektrode* überprüft wurde.

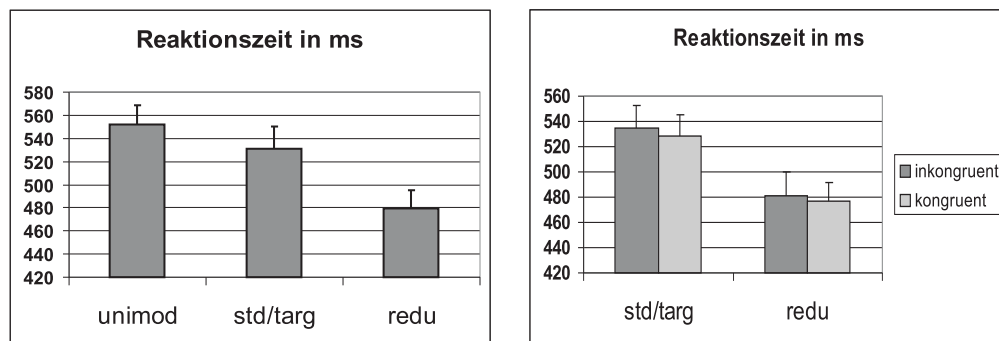


Abbildung 4.2: Links: Reaktionszeiten auf unimodale, nicht-redundante und redundante Reize (links). Reaktionen auch auf nicht-redundante bimodale Reize waren schneller als auf unimodale Reize. Rechts: Reaktionszeiten auf räumlich kongruente bimodale Reize waren ca. 5 ms schneller als auf räumlich inkongruente Reize.

4.3 Ergebnisse

Verhaltensdaten

Der Anteil der Fehlreaktionen auf die Standardreize lag unter 2 % und wurde daher nicht weiter analysiert. Reaktionszeiten auf die Zielreize und Auslassungen sind in Tabelle 4.4 wiedergegeben (vgl. auch Abb. 4.2). Die Detektionsrate war insgesamt sehr hoch (über 95 %), am wenigsten Auslassungen wurden bei den redundanten Zielreizen beobachtet ($F_{1,11} = 25.19$, $p < .001$, Vergleich mit unimodalen Zielreizen). Die Reaktionen auf die redundanten Zielreize (T5...T8) waren am schnellsten, gefolgt von den bimodalen Kombinationen aus Standard- und Targetreizen (C1...C8), am langsamsten waren die Reaktionen auf unimodale Zielreize (T1...T4). Innerhalb der bi-

Tabelle 4.4: Reaktionszeiten und Auslassungen

<i>a – Zielreize (uni-/bimodal)</i>						<i>b – Standard-Target-Kombinationen</i>					
Bez.	links	rechts	RT	SE	Aus	Bez.	links	rechts	RT	SE	Aus
T1	AA		566	17	4.5	C1	AVV		538	18	7.9
T2		AA	564	16	2.4	C2		AVV	532	17	6.4
T3	VV		544	17	5.0	C3	A	VV	529	16	5.2
T4		VV	536	15	4.2	C4	VV	A	539	20	4.9
T5	AAVV		479	18	1.9	C5	AAV		531	19	3.0
T6		AAVV	475	16	0.5	C6		AAV	517	18	2.9
T7	AA	VV	479	15	1.5	C7	AA	V	527	18	2.7
T8	VV	AA	486	16	1.5	C8	V	AA	542	17	2.2

Anmerkung.

A: auditiver Standardreiz, V: visueller Standardreiz, AA: auditiver Zielreiz, VV: visueller Zielreiz, RT: mittlere Reaktionszeit, SE: Standardfehler, Aus: Auslassungen in Prozent

modalen Reize waren die Reaktionen auf die räumlich kongruenten Reize signifikant schneller als auf die räumlich inkongruenten Reize, dieser Effekt wurde sowohl bei den Kombinationsreizen (C1/C2/C5/C6 vs. C3/C4/C7/C8, Unterschied 5.1 ms, einseitiges $p < .01$) als auch bei den redundanten Reizen beobachtet (T5/T6 vs. T7/T8, Unterschied 4.7 ms, einseitiges $p < .05$).

Der *race model*-Test zeigte sowohl bei den räumlich kongruenten (T5/T6) als auch bei den räumlich inkongruenten Zielreizen (T7/T8) Koaktivierung an, die Reaktionszeiten auf die bimodalen Reize waren also schneller, als man aufgrund eines *race model* aus den Reaktionszeiten für die unimodalen Zielreize vorhersagen würde. Die kumulierten Häufigkeitsverteilungen sind in Abbildung 4.3 wiedergegeben.

Wie im vorigen Abschnitt erwähnt, ist der *race model*-Test in Abbildung 4.3 nur in der Lage, Koaktivierung global nachzuweisen. Die Frage, ob der Redundanzgewinn auf eine effizientere Verarbeitung bimodaler Reize im Allgemeinen (*preparation enhancement*, Bernstein et al., 1969; Nickerson, 1973) zurückgeht oder ob darüber hinaus spezifische Koaktivierung von Stimulus-Reaktions-Assoziationen stattfindet, kann beantwortet werden, indem die redundanten Zielreize mit den entsprechenden nicht-redundanten Standard-Target-Kombinationen verglichen werden. Hier zeigte sich ein deutlich reduzierter, aber signifikanter Koaktivierungseffekt bei allen redundanten Stimuli (T5... T8). Die kumulierten Häufigkeitsverteilungen sind in Abbildung 4.4 wiedergegeben.

Ereigniskorrelierte Potentiale

Der Einfluss der räumlichen Beziehung der Komponenten eines bimodalen Reizes auf die multisensorische Integration wurde untersucht, indem die EKPs auf räumlich kongruente Stimuli (S5 + S6, AV links + AV rechts) mit den EKPs auf räumlich inkongruente Stimuli (S7 + S8, A links/V rechts + A rechts/V links, vgl. Abb. 4.5) verglichen wurden. Ein signifikanter räumlicher Kongruenzeffekt wurde ca. 150 ms nach Stimulusdarbietung beobachtet. Dieser Effekt drückte sich in der Wechselwirkung des Fak-

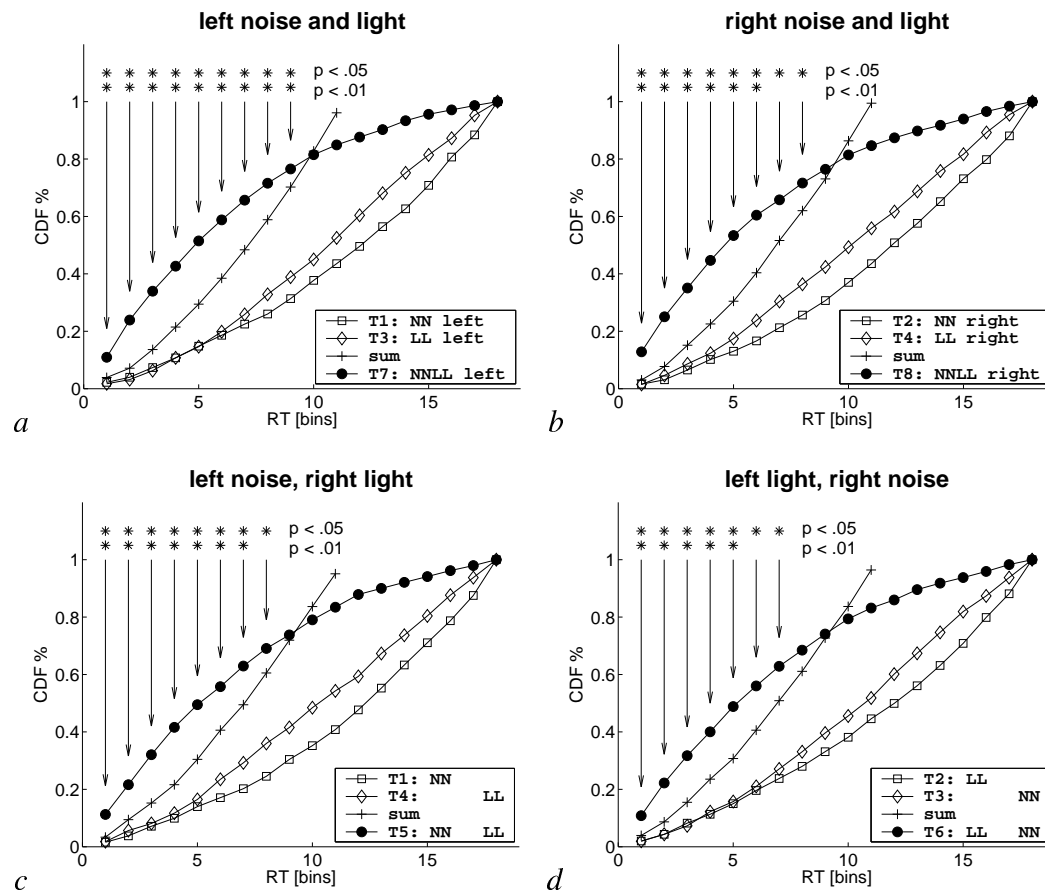


Abbildung 4.3: *Race model*-Test für räumlich kongruente (oben) und räumlich inkongruente redundante Zielreize (unten). Die kumulierten Häufigkeitsverteilungen der Reaktionszeiten für unimodale Zielreize (\square , \diamond) wurden aufsummiert (+), um die obere Grenze der Reaktionszeitverteilung für redundante Reize zu berechnen, die allein durch *statistical facilitation* erreicht werden kann. In allen vier Bedingungen übersteigt die beobachtete Verteilung der Reaktionszeiten auf bimodale Reize (\bullet) die Vorhersage des *race model*; es gibt also einen spezifischen Redundanzgewinn, der durch die Integration des auditiven und des visuellen Reizes zustande kommt (Koaktivierungsmodell).

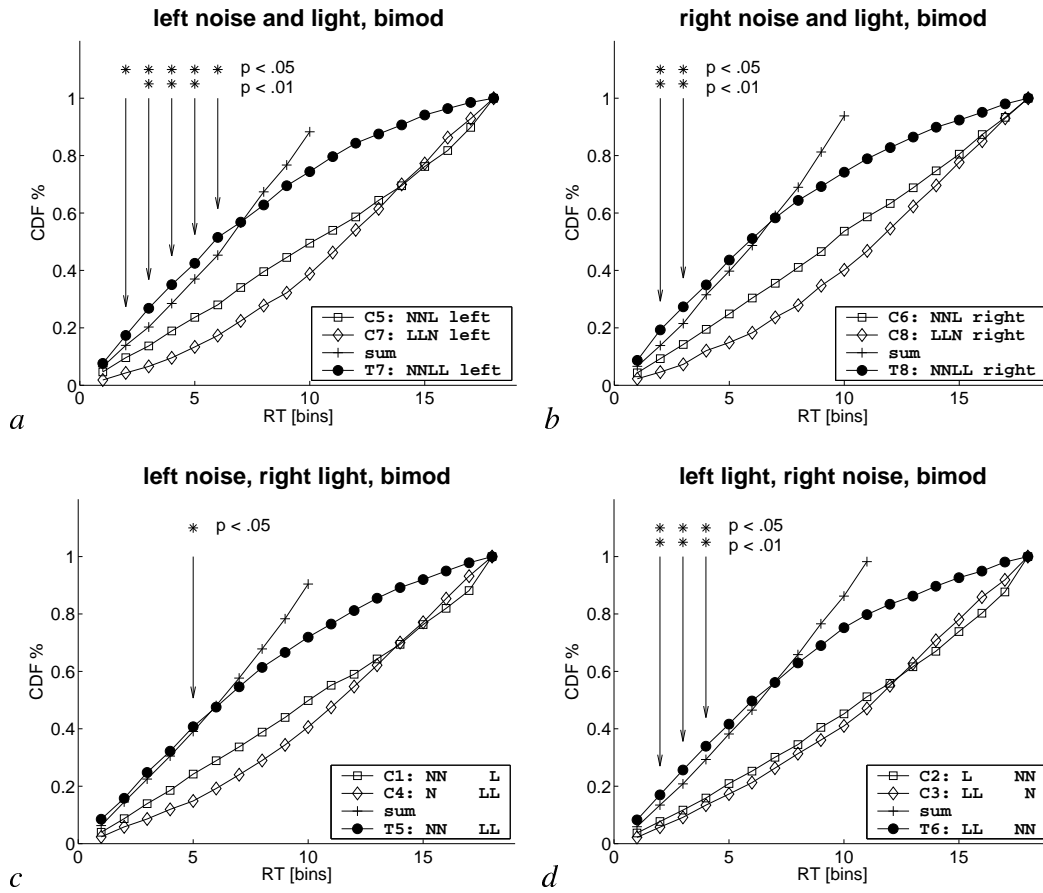


Abbildung 4.4: Race model-Tests, bei denen redundante Zielreize (●, T5...T8) mit bimodalen Kombinationen aus Standards und Targets (□, ◇, nicht-redundante Reize, C1...C8) verglichen werden. Es handelt sich also jeweils um bimodale Reize mit der gleichen räumliche Beziehung, nur die Anzahl der enthaltenen Zielreize unterscheidet sich.

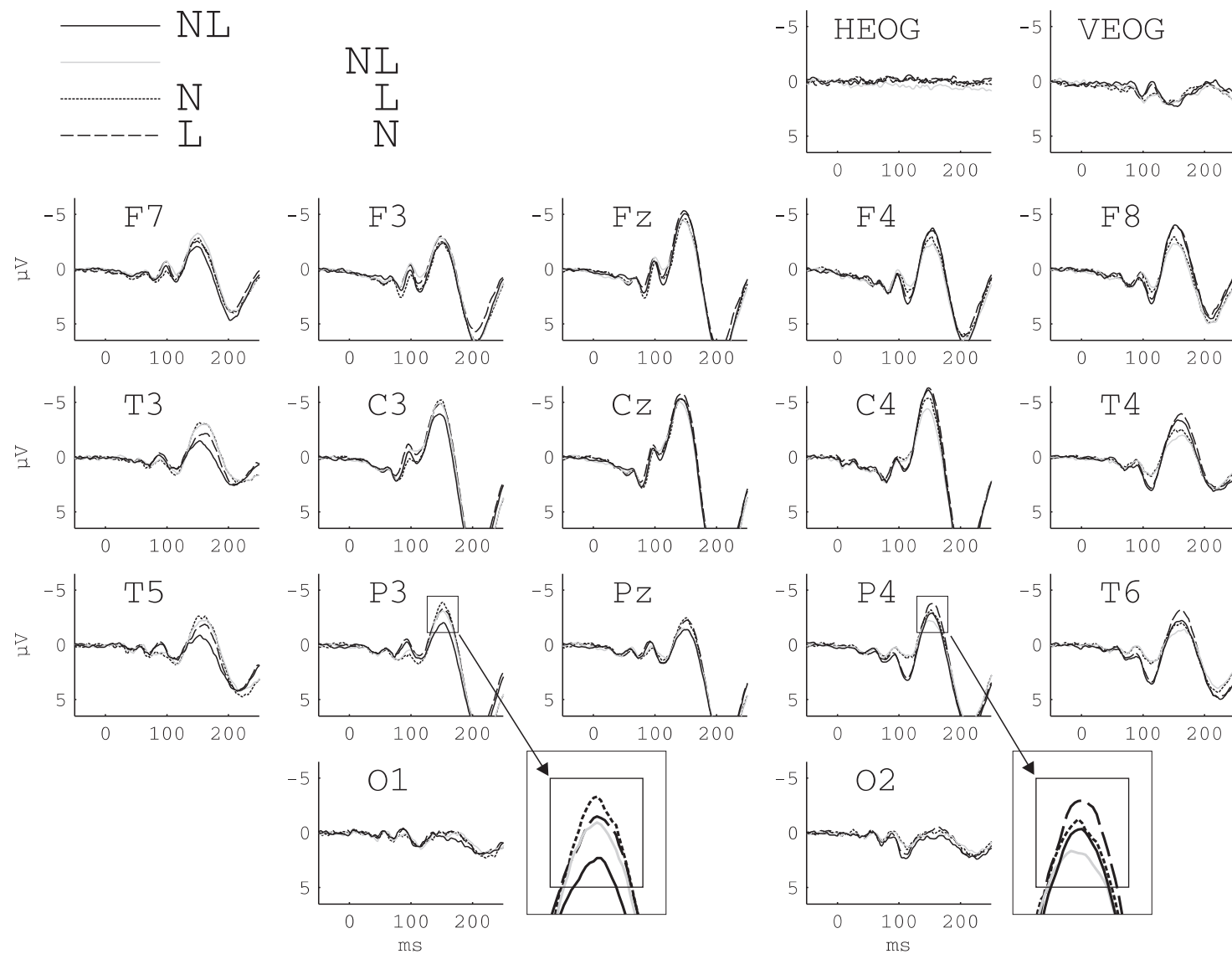


Abbildung 4.5: Ereigniskorrelierte Potentiale auf bimodale Standardreize. Die visuelle N1 ist bei den räumlich inkongruenten Stimuli erhöht.

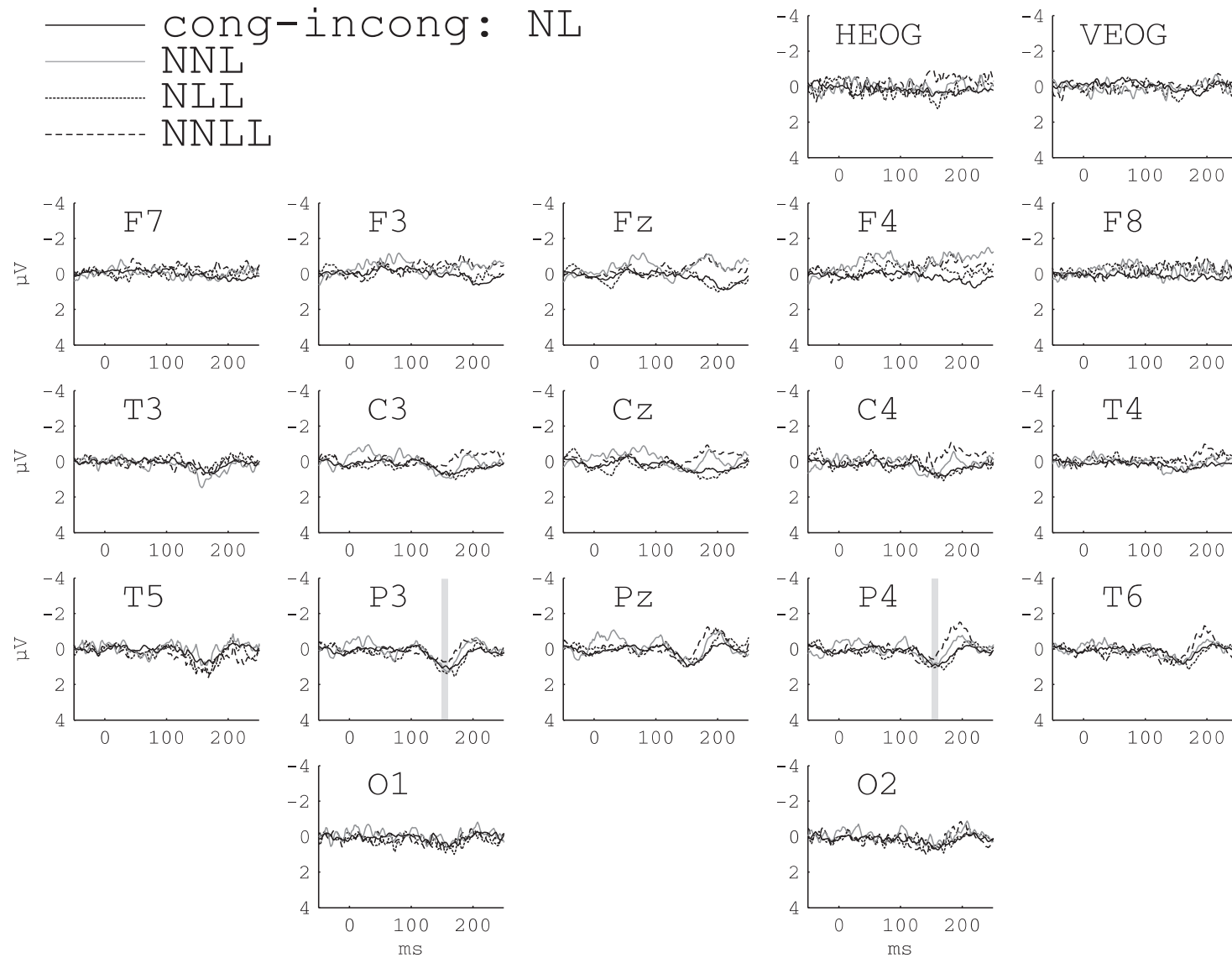


Abbildung 4.6: Räumlicher Kongruenzeffekt: $(AV_L + AV_R) - (A_LV_R + A_RV_L)$. Ca. 150 ms nach Stimulusbeginn ist eine posteriore Positivierung erkennbar (vgl. nächste Abbildung).

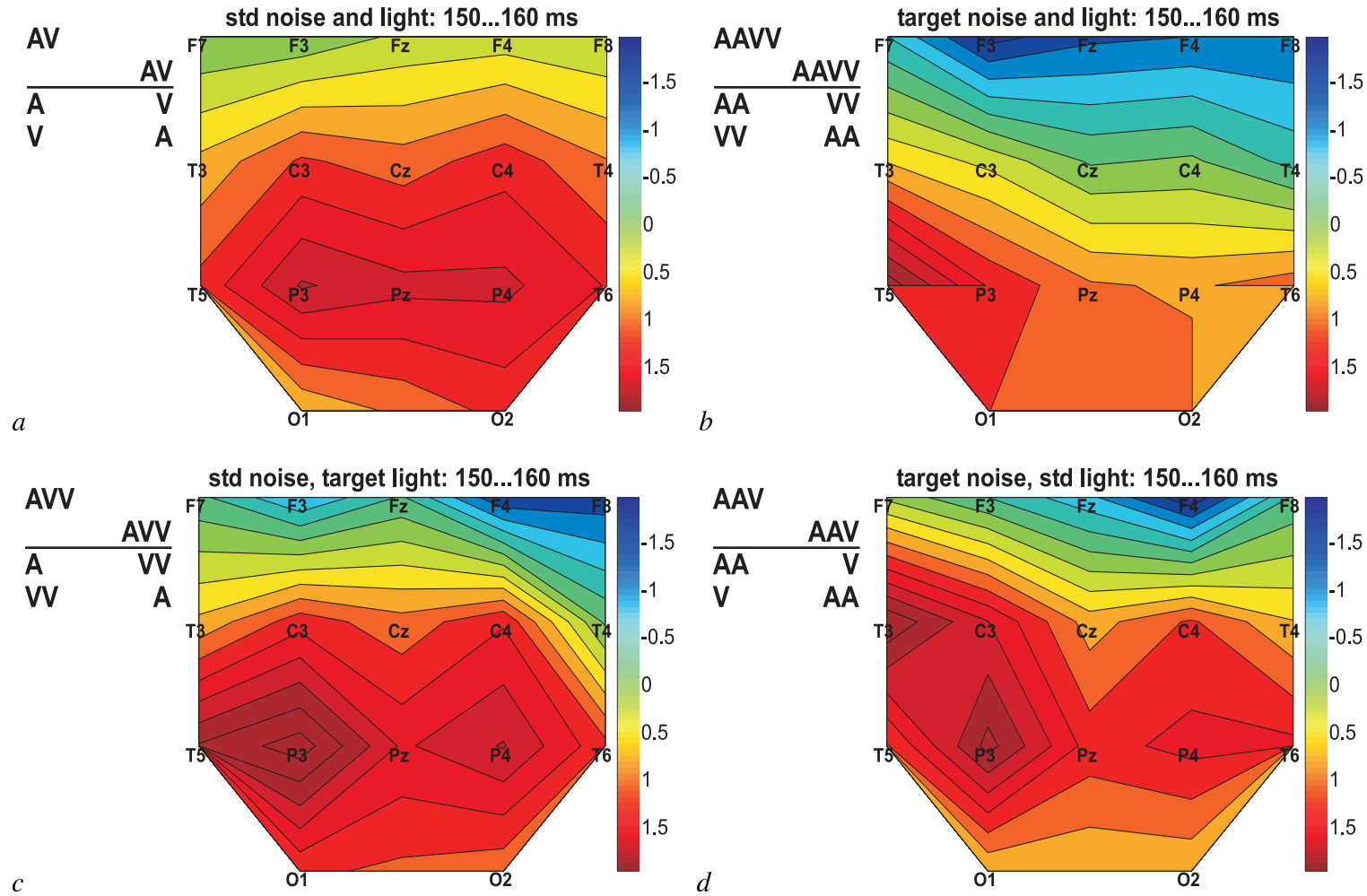


Abbildung 4.7: Räumlicher Kongruenzeffekt (RKE), der sich durch den Vergleich der räumlich kongruenten Reize ($AV_L + AV_R$) mit den räumlich inkongruenten Reizen ($A_LV_R + A_RV_L$) zeigt. (a) gibt den RKE für Standardreize wieder (je 430 Mittelungen pro Vpn), (b)–(d) für die einzelnen Zielreizbedingungen (je 83 Mittelungen pro Vpn).

tors *räumliche Beziehung* mit *Elektrode* aus (150...160 ms: $F_{16,176} = 3.78$, $p = .02$, $\epsilon_{HF} = .20$; 160...170 ms: $F_{16,176} = 3.59$, $p = .01$, $\epsilon_{HF} = .23$) und zeigte sich in Form einer Positivierung über den parietalen Elektroden (P3, P4; 150...160 ms: Kontrast 2: $F_{1,16} = 4.5$, $p < .10$; 160...170 ms: $F_{1,16} = 7.6$, $p < .05$), d. h. die EKPs auf die räumlich kongruenten Reize (S7, S8) waren positiver als diejenigen auf die räumlich inkongruenten Reize (vgl. Abb. 4.6 und 4.7, zu den Kontrasten vgl. Abb. 4.1).

Die Lateralisierung des räumlichen Kongruenzeffekts lässt sich mit dem Vergleich $(S5 + S6) - (S7 + S8)$ nicht untersuchen, da jeweils EKPs auf spiegelbildlich angeordnete Stimuli aufsummiert werden ($AV_L + AV_R$). Zudem sagt die Differenz nicht aus, ob der beobachtete Effekt eine *Positivierung* als Reaktion auf die räumlich kongruenten Stimuli oder eine *Negativierung* als Reaktion auf die räumlich inkongruenten Stimuli ist. Dies kann mit den asymmetrischen EKP-Vergleichen in Abbildung 4.8 untersucht werden.

Der Einfluss eines räumlich kongruenten Reizes auf der linken Seite ist in Abbildungen 4.8a und 4.8c wiedergegeben. In beiden EKP-Vergleichen wird eine rechtsseitige parietale Positivierung sichtbar, kontralateral zum räumlich kongruenten Reiz S5. Dies spiegelt sich für den Vergleich in Abbildung 4.8a in einer signifikanten Interaktion des Faktors *räumliche Beziehung* mit *Elektrode* zwischen 134 ms und 148 ms nach Stimulusdarbietung wider (140...150 ms: $F_{16,176} = 3.7$, $p = .01$, 150...160 ms: $F_{16,176} = 2.1$, $p = .11$). Die entsprechende Wechselwirkung für den äquivalenten Vergleich in Abbildung 4.8c wird allerdings nur kurzzeitig zwischen 152 ms und 156 ms signifikant (140...150 ms: $F_{16,176} = 2.4$, $p = .07$, 150...160 ms: $F_{16,176} = 2.4$, $p = .08$). Wie in Abbildung 4.8 ersichtlich, liegt der Schwerpunkt in beiden Vergleichen (a und c) kontralateral zum räumlich kongruenten Reiz, unabhängig von den übrigen Stimuli im EKP-Vergleich, insbesondere von den beiden spiegelbildlich angeordneten räumlich inkongruenten Reizen S7 und S8 im Subtrahenden.

Der Einfluss eines räumlich kongruenten Reizes auf der rechten Seite wurde mit den EKP-Differenzen in den Abbildungen 4.8b und 4.8d untersucht. Wieder kann man erkennen, dass der räumliche Kongruenzeffekt in beiden Fällen als kontralaterale, d. h.

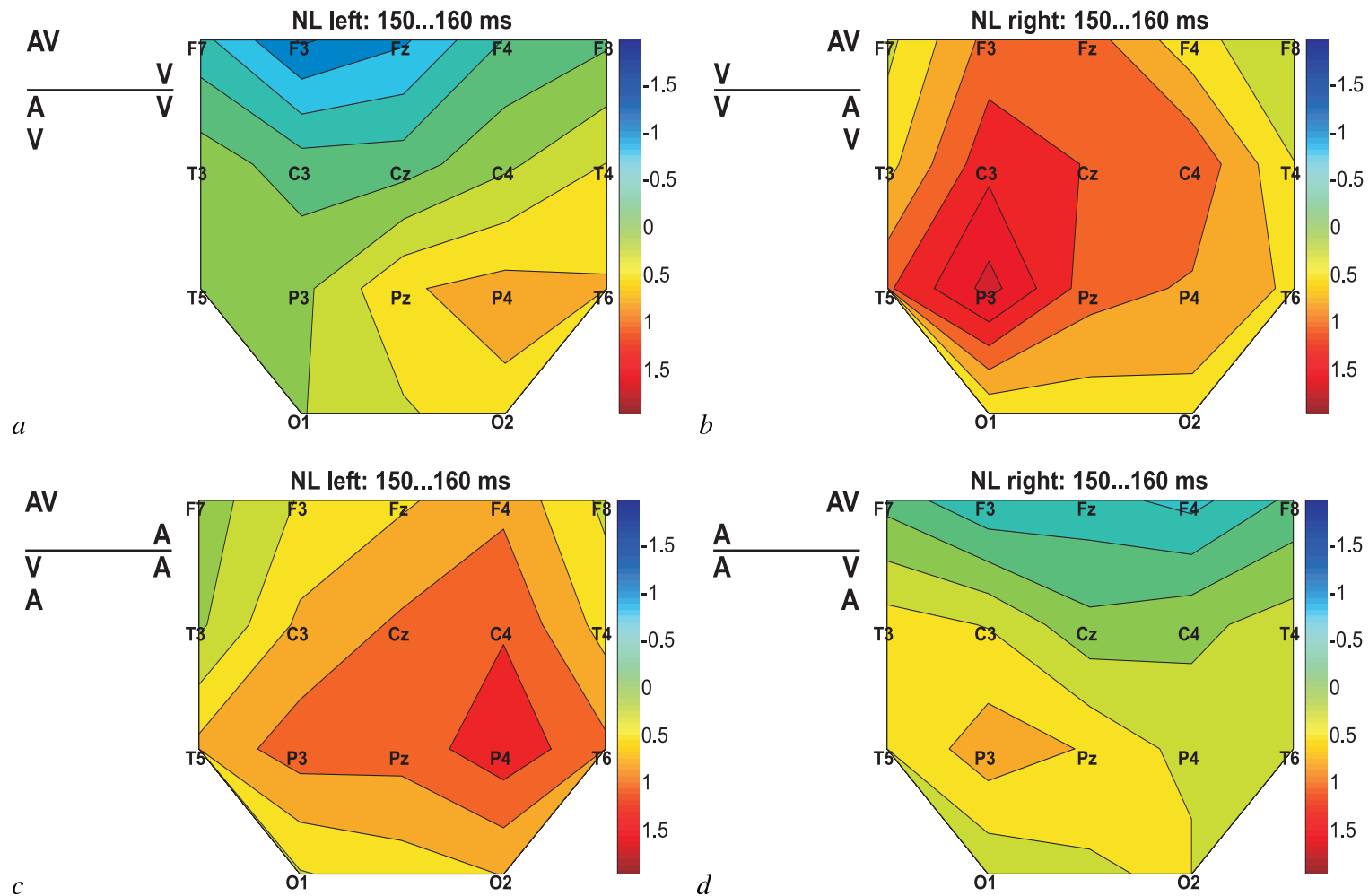


Abbildung 4.8: Räumlicher Kongruenzeffekt, spezifisch für räumlich kongruente Reize auf der linken Seite (a und c) und für räumlich kongruente Reize auf der rechten Seite (b und d). a und c (entsprechend auch b und d) liefern qualitativ dieselben Ergebnisse, obwohl die räumlich inkongruenten Reize in a und c bzw. in b und d spiegelbildlich angeordnet sind.

linksseitige Positivierung an parietalen Ableitungen zeigt. Die Wechselwirkung von *räumlicher Beziehung* und *Elektrode* wird in der Auswertung nach Abbildung 4.8b im Zeitraum 132 ms...144 ms signifikant (140...150 ms: $F_{16,176} = 4.0$, $p = .01$, 150...160 ms: $F_{16,176} = 2.6$, $p = .09$), in der Auswertung nach Abbildung 4.8d konnte allerdings lediglich eine Tendenz zu höheren F-Werten im Zeitraum um 150 ms beobachtet werden (140...150 ms: $F_{16,176} = 1.0$, $p = .40$, 150...160 ms: $F_{16,176} = 1.4$, $p = .27$).

4.4 Diskussion

In der vorliegenden Teilstudie wurde untersucht, inwieweit die räumliche Beziehung der beiden Komponenten eines auditiv-visuellen Reizes einen Einfluss auf die multisensorische Integration hat. Hierfür wurde ein experimenteller Aufbau realisiert, bei dem uni- und bimodale Reize von zwei Orten präsentiert wurden, links und rechts. Bei den bimodalen Reizen wurden beide Teilstimuli entweder am gleichen Ort (räumlich kongruente Reize) oder an unterschiedlichen Orten dargeboten (räumlich inkongruente Reize). Die Annahme war, dass der Redundanzgewinn bei räumlich kongruenten Reizen weitaus höher ausfällt als bei räumlich inkongruenten Reizen, da die multisensorische Integration, zumindest auf der Ebene des Colliculus superior, stark von der räumlichen Beziehung der beiden Reizkomponenten beeinflusst wird (Meredith & Stein, 1987; Wallace et al., 1992). Weiter wurde angenommen, dass räumliche Kongruenzeffekte an einer vergleichsweise frühen Station der kognitiven Verarbeitung wirksam werden, bevor etwa die Bedeutung (besser: Antwortrelevanz) der Stimuli analysiert wird.

Die Ergebnisse entsprachen den Hypothesen nur teilweise: Zum einen schienen die Versuchspersonen bereits von der bimodalen Stimulation *per se* zu profitieren, unabhängig davon, ob auf den zusätzlichen Stimulus reagiert werden musste oder nicht (vgl. Abb. 4.2a). Unspezifische intersensorische Effekte dieser Art wurden bereits von Bernstein et al. (1969) und Simon und Craft (1970, Abb. 1, no-tone vs. binaural) berich-

tet. Die Wahrnehmung und Verarbeitung des Zielreizes scheint durch den zusätzlichen Stimulus wesentlich effizienter abzulaufen, was mit dem Modell von Nickerson (1973, vgl. auch Bernstein, 1970 und Welch & Warren, 1986) erklärt werden kann: Nickerson unterscheidet zwei Mechanismen der multisensorischen Integration, die für den Reaktionszeitgewinn bei bimodalen Reizen verantwortlich sind: *energy summation* und *preparation enhancement*. *Preparation enhancement* führt zu einem allgemein höheren Erregbarkeitszustand des Wahrnehmungssystems, der sich in schnelleren Reaktionen zeigt. Dieser Mechanismus kommt ohne einen Austausch von Informationen zwischen den einzelnen Sinneskanälen aus (Schmidt et al., 1984). *Energy summation* hingegen bedeutet, dass die Informationen der beiden Sinnessysteme spezifisch integriert werden. In einem einfachen Redundanzexperiment mit Einfachreaktionen auf auditive und visuelle Stimuli sind beide Mechanismen konfundiert. Die Ergebnisse in der vorliegenden Teilstudie liefern insofern deutliche Hinweise auf *preparation enhancement*, denn auch die Reaktionen auf nicht-redundante bimodale Reize waren deutlich schneller als die Reaktionen auf unimodale Reize.

Verwendet man nicht die unimodalen Zielreize, sondern bimodale Kombinationsreize aus Standards und Targets für den *race model*-Test, kann man den Einfluss des anderen von Nickerson (1973) vorgeschlagenen Mechanismus (*energy summation*), schätzen (Abb. 4.4). Der Einfluss der bimodalen Stimulation als solche ist aus diesem Test eliminiert, denn es werden nur bimodale Stimuli mit einer unterschiedlichen Anzahl von Zielreizen verwendet. Wie man in Abbildung 4.4 erkennen kann, verringert sich das Ausmaß der *race model*-Verletzung hierdurch deutlich. Die Kombination eines Standardreizes mit einem Zielreiz führt allerdings zu einem gewissen Reaktionskonflikt bei Reaktionen auf Standard-Target-Kombinationen, denn auf den Zielreiz soll die Versuchsperson reagieren, auf den Standard jedoch nicht. Insofern kann der Koaktivierungseffekt in Abbildung 4.4 nur als obere Grenze der Koaktivierung gelten, die über *preparation enhancement* hinaus wirksam ist. Es wäre sogar durchaus denkbar, dass die „wahren“ Reaktionszeiten (ohne Reaktionskonflikt) in Abbildung 4.4 einem *race model* folgen. Dies würde bedeuten, dass der Reaktionszeitgewinn in der vor-

liegenden Teilstudie gänzlich auf das Konto von *preparation enhancement* und eines geringen, aber stabilen räumlichen Kongruenzeffekts geht (vgl. folgender Absatz).

Der Gewinn durch die räumlich kongruente Stimulation war weitaus geringer als erwartet: Reaktionen auf räumlich kongruente redundante Reize waren im Mittel nur ca. 5 ms schneller als Reaktionen auf räumlich inkongruente Reize (vgl. Abb. 4.2b). Sie lagen daher größenordnungsmäßig im Bereich der *interhemispheric transmission time* (Poffenberger, 1912), also der Zeit, die ein neuronales Signal benötigt, um von einer Hemisphäre in die andere gesendet zu werden. Es stellt sich daher die Frage, ob der räumliche Kongruenzeffekt, wie er in der vorliegenden Teilstudie beobachtet wurde, nicht lediglich einen „Inkongruenzeffekt“ anderer Art widerspiegelt: Schließlich profitierten die Versuchspersonen ja von jeder Art der bimodalen Stimulation, die beiden Komponenten eines auditiv-visuellen Reizes wurden also immer integriert (vgl. Abb. 4.3). Im Falle der räumlich inkongruenten Stimuli mussten hierfür allerdings Informationen zwischen den Hirnhemisphären ausgetauscht werden, was mit gewissen Reaktionszeitverlusten verbunden sein sollte.

Dass der räumliche Kongruenzeffekt so gering ausfiel, könnte aber auch daran liegen, dass sich die Versuchspersonen während des Experiments nicht immer auf den zentralen Fixationspunkt konzentriert haben, sondern ihre räumliche Aufmerksamkeit ab und zu auf die seitlich befindlichen Reizquellen gelenkt haben (vgl. z. B. Fournier & Eriksen, 1990). Räumliche Aufmerksamkeit führt zu einer effizienteren Verarbeitung der Stimuli und hierdurch zu schnelleren Reaktionen (Posner, Nissen & Ogden, 1978); auch die Redundanzgewinne sind bei räumlicher Aufmerksamkeit höher (Feintuch & Cohen, 2002, vgl. auch die Teilstudie in Kap. 5). Achtet die Versuchsperson nur auf eine der beiden Reizpositionen, wird dies bei 50 % der räumlich kongruenten Reize der falsche Reiz sein, die Reaktionen werden entsprechend langsamer. Bei den räumlich inkongruenten Reizen hingegen wird zumindest eine Reizkomponente beachtet, denn es wird ja auf beiden Seiten ein Reiz dargeboten, die Reaktionszeiten sollten unbeeinträchtigt bleiben.

Andere Sequenzeffekte, wie *inhibition of return* (Quinlan & Hill, 1999; Tassinari

et al., 2002) könnten ebenfalls Verlangsamung bei zwei aufeinanderfolgenden Stimuli an der gleichen Position führen. Dies würde wiederum primär die Reaktionen auf die räumlich kongruenten Reize verlangsamen. Um wie viel der räumliche Kongruenzeffekt hierdurch verringert wird, kann mit der vorliegenden Teilstudie nicht beantwortet werden, denn die Anzahl der Zielreiz-Zielreiz-Sequenzen ist zu gering. Räumliche Kongruenzeffekte waren auch in anderen Studien eher gering ausgeprägt: Corballis et al. (2002) berichten lediglich, dass Reaktionen auf visuelle Doppelreize auf der gleichen Seite signifikant schneller gewesen seien; bei Teder-Sälejärvi et al. (in press) waren Reaktionen auf räumlich kongruente auditiv-visuelle redundante Zielreize ca. 6 ms schneller (n. s.), bei Forster et al. (2002) waren Reaktionen auf räumlich kongruente visuell-taktile Reize ca. 3 ms schneller (n. s., Tab. 1, Bedingung „medium“).

Bestätigt wurde die Erwartung, dass der räumliche Kongruenzgewinn unabhängig von der Antwortrelevanz anfiel. Er konnte sowohl bei den redundanten Reizen beobachtet werden als auch bei den Kombinationen von Standard- und Targetreizen (vgl. Abb. 4.2b). Nach der additiven Faktorenlogik (Sternberg, 1969) weist dies auf unabhängige Verarbeitungsstufen für räumliche Kongruenz und Bedeutung/Antwortrelevanz der Reize hin. Dies lässt sich mit den Vorschlag von Beauchamp (2004) vereinbaren: basale Integrationsmechanismen zum Ausrichten der räumlichen Aufmerksamkeit auf der Ebene des Colliculus superior (*“integration for action”*), Wahrnehmung und Objekterkennung auf der Kortexebene (*“integration for perception”*). Die vergleichsweise einfache Aufgabe in der vorliegenden Teilstudie führt jedoch vermutlich vorwiegend zu Redundanzgewinnen auf der Ebene basaler Integrationsmechanismen (*preparation enhancement*, Nickerson, 1973).

Der EKP-Vergleich der räumlich kongruenten bimodalen Reize mit den räumlich inkongruenten Reizen zeigte eine Positivierung über parietalen Ableitorten zwischen 140 und 170 ms nach Darbietung des Stimulus (Abb. 4.6 und 4.7). Der Schwerpunkt der Positivierung lag hierbei kontralateral zum räumlich kongruenten Reiz (Abb. 4.8), und zwar unabhängig davon, welcher räumlich inkongruente Reiz zum Vergleich herangezogen wurde (vgl. hierzu Abb. 4.8a und c, Abb. 4.8b und d). Die Positivierung

kann demnach als spezifische, kontralateral lokalisierte Antwort des Gehirns auf den räumlich kongruenten Stimulus angesehen werden. Hierfür kommt z. B. der intraparietale Sulcus (IPS) in Frage: Aktivierung im IPS bei auditiv-visuellen Vergleichsaufgaben wurde z. B. von Lewis, Beauchamp und DeYoe (2000) berichtet. Macaluso und Driver (2001) zeigten, dass der kontralaterale IPS auch bei einfacher visueller und taktiler Stimulation aktiviert wird (s. a. Graziano & Gross, 1995). Einzelzell-Ableitungen im IPS von Makakken lieferten Hinweise auf auditiv-visuelle Interaktionen bereits 60 ms nach Stimulusdarbietung, mit einem Maximum bei ca. 150 ms (Mazzoni, Bracewell, Barash & Andersen, 1996).

Latenz und Lokalisation des räumlichen Kongruenzeffekts (Abb. 4.7) können mit Befunden von Fort et al. (2002), Teder-Sälejärvi et al. (2002) und mit dem Befund der Teilstudie in Kapitel 3 in Verbindung gebracht werden. Fort et al. beobachteten eine Positivierung über parieto-okzipitalen Arealen ca. 170 ms nach Stimulusdarbietung beim Vergleich eines bimodal evozierten Potentials mit der Summe der unimodal evozierten Potentiale [$AV - (A + V)$, vgl. hierzu auch Kap. 3]. Teder-Sälejärvi et al. (2002) beobachteten eine ähnliche Positivierung ca. 175 ms nach Darbietung des Stimulus. Zieht man in Betracht, dass ein räumlicher Kongruenzeffekt im EKP-Vergleich $AV - (A + V)$ implizit enthalten ist (der bimodale Reiz war ein räumlich kongruenter Reiz in den genannten Untersuchungen), dann spiegelt der Befund in Abbildung 4.7 genau diesen Teil der multisensorischen Interaktionen wider.

Die Latenz des räumlichen Kongruenzeffekts entspricht der Latenz der visuellen N1. Die Positivierung in Abbildung 4.7 könnte insofern auch als Reduktion der visuellen N1 angesehen werden (vgl. Abb. 4.6, Elektroden P3 und P4). Die Amplitude der visuellen N1 variiert mit dem Ausmaß, mit dem der visuelle Stimulus die Aufmerksamkeit auf sich zieht (Arnott, Pratt, Shore & Alain, 2001). Giard und Peronnet (1999) argumentieren, dass die Orientierung hin zu einem bimodalen Reiz weniger Ressourcen erfordert als zu einem unimodalen Reiz (bzw. durch den auditiven Reiz sind die Ressourcen bereits gebunden), entsprechend ist die visuelle N1 beim bimodalen Reiz verringert. Dieser Mechanismus scheint noch stärker wirksam zu werden, wenn es sich

bei dem Reiz um einen räumlich kongruenten Reiz handelt.

5 Räumliche Aufmerksamkeit

5.1 Hintergrund

Wahrnehmung und Verarbeitung der Sinnesinformationen aus einer komplexen Umgebung sind in hohem Maße von Aufmerksamkeit abhängig. Räumliche Aufmerksamkeit wirkt hierbei wie ein „Scheinwerfer“ (Posner et al., 1978), der einen Bereich der Umgebung ausleuchtet, wobei die Ausrichtung dieses Scheinwerfers nicht mit der Ausrichtung der Blickbewegung übereinstimmen muss. Aufmerksamkeit scheint zum einen ein einheitliches System zu sein, d. h. es fällt schwer, die Aufmerksamkeit auf zwei getrennte Wahrnehmungsdimensionen gleichzeitig zu richten, z. B. auf inhaltliche und räumliche Objekteigenschaften gleichzeitig zu achten (Deutsch & Deutsch, 1963). Aufmerksamkeit ist zum anderen stark an das Bewusstsein und an Willenshandlungen gebunden. Allport (1989) bezeichnet Aufmerksamkeit als einen *gating*-Mechanismus bei der Weiterleitung von Sinnesinformationen an die Exekutive, d. h. an Zentren, die für Reaktionsauswahl und Reaktionssteuerung zuständig sind.

Hat eine Versuchsperson z. B. die Aufgabe, visuelle Stimuli zu klassifizieren, die entweder links oder rechts von einem Fixationskreuz dargeboten werden, beobachtet man schnellere Reaktionen, wenn vor der Darbietung des Zielreizes ein Hinweisreiz erscheint, der die Seite angibt, an welcher der Stimulus erscheint. Zeigt der Hinweisreiz hingegen in die falsche Richtung, sind die Reaktionszeiten langsamer (Posner et al., 1978). Dieser Effekt tritt auch dann auf, wenn die Versuchsperson keine Augenbewegungen in Richtung des erwarteten Reizes ausführt und wird daher auch als *covert shift of spatial attention* bezeichnet. Die effizientere Verarbeitung von Stimuli an einem

beachteten Ort zeigt sich auch in ereigniskorrelierten Potentialen: Hat eine Versuchsperson z. B. die Aufgabe, auf Zielreize aus einem Lautsprecher auf der linken Seite zu reagieren, zeigt sich eine erhöhte auditive N1, wenn Stimuli an diesem Lautsprecher präsentiert werden. Am unbeachteten Lautsprecher fällt die auditive N1 entsprechend geringer aus (Hillyard, Hink, Schwent & Picton, 1973; Näätänen, Gaillard & Mantysalo, 1978). Veränderte evozierte Potentiale auf Reize am beachteten Ort wurden auch bei visueller Stimulation beobachtet (Eason, Harter & White, 1969; Hillyard & Picton, 1987). Die Ausrichtung der räumlichen Aufmerksamkeit scheint hierbei nicht auf ein Sinnessystem beschränkt zu sein, denn die auditive N1 ist auch erhöht, wenn am beachteten Ort auf visuellen Reize reagiert werden soll (Hillyard et al., 1984).

Eine wichtige Funktion der räumlichen Aufmerksamkeit für die Objekterkennung wird in der *feature integration theory* (FIT) beschrieben (Treisman & Gelade, 1980; Treisman, 1986): Sucht eine Versuchsperson ein Objekt aus einer Menge von anderen Objekten, das sich in nur einer Dimension von den anderen Objekten unterscheidet (z. B. grüner Kreis in einer Menge von roten Kreisen), dann kann sie das gesuchte Objekt sehr schnell in der Menge der anderen Objekte identifizieren. Das heißt, die Suchzeit wird nur in geringem Maße von der Anzahl der Distraktor-Objekte beeinflusst. Die grundlegende Zerlegung der visuellen Szene findet also bereits auf einer sehr frühen Wahrnehmungsstufe statt, Treisman und Gelade sprechen hierbei von dimensional organisierten Wahrnehmungsmodulen für Farbe, Größe, Form, Orientierung usw. Eine Suche dieser Art ist auch dann noch effizient, wenn die Person gleichzeitig eine andere Aufgabe erledigen muss, also ihre Aufmerksamkeit auf andere Objekte richtet.

Wird das gesuchte Objekt hingegen durch eine Kombination von Eigenschaften definiert, sucht die Person z. B. ein rotes Quadrat in einer Menge von grünen Quadraten und roten Kreisen, dauert die Suche wesentlich länger und ist zudem stark von der Anzahl der übrigen Objekte abhängig. Die Person scheint alle Objekte einzeln analysieren zu müssen, zumindest bis sie das gesuchte Objekt entdeckt hat. Die Suche nach kombinierten Objekteigenschaften wird außerdem durch eine konkurrierende Aufgabe

stark erschwert: Die Verknüpfung der Informationen aus den Wahrnehmungsmodulen scheint also Aufmerksamkeit zu erfordern, die Person muss jedes einzelne Objekt „konzentriert“ untersuchen.

Das *dimensional action model* (DA-Modell, A. Cohen & Shoup, 1997) unterstreicht ebenfalls die Bedeutung der räumlichen Aufmerksamkeit bei der Verarbeitung konkurrierender visueller Stimuli, z. B. in *flanker tasks*. Beim *flanker task* soll die Versuchsperson, auf einen zentralen Zielreiz bestimmte Entscheidungsreaktionen ausführen. Neben dem zentralen Zielreiz werden Distraktoren präsentiert, die die Versuchsperson ignorieren soll. Die Distraktoren können kongruent, neutral oder inkongruent sein. Neutrale Distraktoren haben mit der Aufgabe nichts zu tun, kongruente Distraktoren würden im Prinzip die gleiche Reaktion erfordern wie der zentrale Zielreiz, inkongruente Distraktoren würden hingegen eine andere Reaktion als der Zielreiz erfordern. Eriksen und Eriksen (1974) beobachteten, dass die Versuchspersonen die Distraktoren i. d. R. nicht ignorieren können, was zu schnelleren Reaktionen bei kongruenten Distraktoren und langsameren Reaktionen bei inkongruenten Distraktoren führt, wenn man die Reaktionen bei neutralen Distraktoren zum Vergleich heranzieht. Dieser Effekt zeigt sich besonders deutlich, wenn die Distraktoren in engem räumlichen Abstand zu den Zielreizen präsentiert werden (B. A. Eriksen & Eriksen, 1974; C. W. Eriksen & Hoffman, 1972).

Aufbauend auf der FIT geht das DA-Modell ebenfalls von separierbaren Wahrnehmungsmodulen aus, die die grundlegenden Eigenschaften einer visuellen Szene unabhängig voneinander und automatisiert verarbeiten können. Diese Module können jeweils Stimuluseigenschaften erkennen und gegebenenfalls Reaktionen einleiten. Cohen und Shoup (1997) beobachteten allerdings, dass dieser Kongruenzeffekt nur dann auftritt, wenn das konkurrierende Merkmal des Distraktors zur selben Wahrnehmungsdimension gehört wie das kritische Merkmal des Zielreizes. Soll die Versuchsperson z. B. mit links reagieren, wenn ein Stimulus rot ist oder ein Kreis, und soll sie mit rechts reagieren, wenn ein Stimulus grün ist oder ein Quadrat, dann wird die Reaktion auf einen roten Zielreiz nur von einem grünen Distraktor gestört, d. h. durch einen Reiz,

der zur gleichen Wahrnehmungsdimension (Farbe) gehört wie der Zielreiz. Ist der Distraktorreiz ein Quadrat, wird die Reaktionszeit nicht beeinträchtigt, denn Form ist eine andere Wahrnehmungsdimension. Distraktoreffekte finden also nach dem DA-Modell nur innerhalb einer Wahrnehmungsdimension statt, in diesem Fall innerhalb der Dimension Farbe. Die Antworttendenz, die mit einem Wahrnehmungsmodul verbunden ist, kann durch andere Module nicht gestört werden.

Bei der in Treisman und Gelade (1980) beschriebenen Suchaufgabe wird ein Objekt durch die Kombination von Eigenschaften definiert, es liegt also eine logische Und-Verknüpfung vor: rot *und* Quadrat. Im Redundanzexperiment hingegen wird der Zielreiz durch eine Oder-Verknüpfung festgelegt: Ton *oder* Licht, bzw. bei rein visuellen Aufgaben: nach links geneigt oder grün (Feintuch & Cohen, 2002). Nach dem DA-Modell sollte Koaktivierung v. a. zwischen Merkmalen *verschiedener* Wahrnehmungsdimensionen stattfinden (Feintuch & Cohen, 2002): Innerhalb eines Moduls führen kongruente Reizinformationen allenfalls zu *statistical facilitation* (vgl. Abschnitt 0.2, S. 7), wohingegen kongruente Reizinformationen verschiedener Wahrnehmungsmodule gewinnbringend integriert werden könnten. Feintuch und Cohen (2002) zeigten z. B., dass die Reaktionszeitverteilungen bei redundanten visuellen Reizen dem Koaktivierungsmodell folgen, wenn die redundanten Merkmale auf unabhängigen Wahrnehmungsdimensionen lagen (Farbe und Linienorientierung bei Feintuch & Cohen, 2002). Bei den meisten unimodalen Redundanzexperimenten wurde hingegen lediglich ein *race model*-Effekt beobachtet (Corballis, 2002; Murray et al., 2001; Miniussi et al., 1998): In diesen Untersuchungen waren die redundanten Reize zumeist doppelte Einfachreize (z. B. zwei Lichtreize statt einem), und lagen daher auf der gleichen Wahrnehmungsdimension. Hören und Sehen können als unabhängige Wahrnehmungsdimensionen aufgefasst werden, im bimodalen Redundanzexperiment wird entsprechend häufig Koaktivierung beobachtet (vgl. Kap. 1–4, Diederich & Colonius, in press; Giray & Ulrich, 1993; Miller, 1982, 1986, 1991; Molholm et al., 2002; Murray et al., in press; Plat et al., 2000).

Bei der Suchaufgabe ist visuell-räumliche Aufmerksamkeit notwendig, um In-

formationen der verschiedenen Wahrnehmungsmodule zu kombinieren. Entsprechend schränkt das DA-Modell ein, dass Koaktivierung (also die effiziente Oder-Verknüpfung oder „Integration“ der Informationen) nur dann stattfindet, wenn beide zu beurteilenden Merkmale im Fokus der visuellen Aufmerksamkeit liegen (Feintuch & Cohen, 2002; Fournier & Eriksen, 1990). Feintuch und Cohen konnten zeigen, dass bei redundanten visuellen Stimuli, die mit etwas Abstand oberhalb und unterhalb des Fixationspunkts dargeboten wurden, keine Koaktivierung mehr auftrat. Setzten sie einen Rahmen um die beiden Teilstimuli, so dass der Eindruck entstand, die Reize gehörten nun zu einem Objekt, wurde Koaktivierung beobachtet. Der Rahmen scheint demnach die Fokussierung der visuellen Aufmerksamkeit auf beide Teilstimuli ermöglicht zu haben.

Die vorliegende Teilstudie untersucht in zwei Experimenten, ob das DA-Modell auch für die multisensorische Integration von redundanten bimodalen Reizen gilt: Ist räumliche Aufmerksamkeit für die Koaktivierung bei auditiv-visuellen Reizen notwendig? Hierfür wurden auditive, visuelle und bimodale Stimuli an drei Positionen dargeboten (links, zentral und rechts). In der ersten Versuchsbedingung wurden die Reize nur an der zentralen Position präsentiert, die Versuchsperson konnte ihre räumliche Aufmerksamkeit entsprechend auf den zentralen Ort richten. In der zweiten Versuchsbedingung wurden auditive, visuelle und auditiv-visuelle Reize in unregelmäßiger Reihenfolge an allen drei Positionen präsentiert, entsprechend war die Fokussierung der räumlichen Aufmerksamkeit nicht mehr ohne weiteres möglich, weil die Versuchsperson nicht wissen konnte, an welchem Ort der nächste Stimulus dargeboten wurde. Das Hauptinteresse lag auf dem Vergleich der Koaktivierungseffekte am *zentralen* Lautsprecher unter den beiden Aufmerksamkeitsbedingungen.

Im ersten Experiment wurden der auditive und der visuelle Teilstimulus jeweils gleichzeitig dargeboten. Da sich die Reaktionszeiten auf die unimodalen Reize v. a. an den peripheren Positionen stark unterschieden, wurden der auditive und der visuelle Reiz in Experiment 2 versetzt dargeboten, um diesen Unterschied in etwa auszugleichen (Bernstein et al., 1969).

5.2 Experiment 1 – Methode

Stichprobe

An Experiment 1 nahmen 14 Versuchspersonen teil. Es handelte sich zumeist um Studenten des Fachbereichs Psychologie der Universität Marburg (20–29 Jahre, 10 weibliche, 4 männliche Vpn). Die Teilnahme am Versuch war freiwillig und wurde für Studienzwecke bescheinigt bzw. mit 7 €/Stunde vergütet. Alle Versuchspersonen hörten und sahen normal (Selbstauskunft) bzw. trugen eine Brille.

Stimuli und Aufgabe

Auditive, visuelle und bimodale Reize wurden von drei Lautsprechern dargeboten, auf die jeweils zwei kleine Leuchtdioden montiert waren. Einer der Lautsprecher befand sich ca. 80 cm direkt vor der Person, einer war 30° links und einer 30° rechts davon platziert. Der auditive Reiz (A) war ein deutlich hörbares, kurzes weißes Rauschen (20 ms, 55 dBA), der visuelle Reiz (V) war ein deutlich sichtbares, kurzes Aufblinken eines LED-Pärchens (20 ms, 60 mcd). Bimodale Reize (AV) waren simultane auditive und visuelle Reize, die am selben Ort dargeboten wurden. Die Aufgabe bestand darin, auf alle drei Stimuli (A, V, AV) möglichst schnell per Fußschalter zu reagieren, egal an welchem Ort der Reiz dargeboten wurde. Hierzu hatte sie 1000 ms Zeit, das Intervall zwischen zwei Reizen lag zwischen 1500 und 2000 ms. Im ersten Durchgang („fokussierte Aufmerksamkeit“) wurden Reize nur am mittleren Lautsprecher dargeboten, jeweils 80 auditive, visuelle und bimodale Reize in zufälliger Reihenfolge. Um die Versuchsperson von Spontanreaktionen abzuhalten, wurden zusätzlich 80 Lücken in die Sequenz gestreut, in denen nach dem üblichen Inter-Stimulus-Intervall kein Reiz dargeboten wurde. Im zweiten Durchgang („verteilte Aufmerksamkeit“) wurden Reize in zufälliger Folge an allen drei Positionen dargeboten, jeweils 320 auditive, visuelle und bimodale Reize an jedem Lautsprecher. Wiederum wurden 320 „Lücken“ in die Sequenz gestreut, um die Versuchspersonen von Spontanreaktionen abzuhalten. Der erste

Durchgang wurde in zwei ca. vierminütigen Blöcken durchgeführt, der zweite Durchgang in acht ca. sechsminütigen Blöcken. Nach jedem Block wurde der Reaktionsfuß gewechselt. Inklusive Pausen dauerte ein Versuch ca. 90 Minuten.

Datenauswertung

Kumulierte Häufigkeitsverteilungen der Reaktionszeiten auf die verschiedenen Stimuli wurden wie bei Corballis (2002) generiert: Zunächst wurden für jede Versuchsperson aus allen Reaktionszeiten 18 *bins* gleicher Anzahl erstellt. In einem zweiten Schritt wurden die Reaktionszeiten zu den verschiedenen Stimuli in die *bins* sortiert und die Anzahl durch die Gesamtzahl der jeweiligen gültigen Reaktionen geteilt, um relative Häufigkeiten zu erhalten. Schließlich wurde für jeden *bin* ein Vorzeichentest gerechnet, um zu überprüfen, ob bin_{AV} größer ist als $bin_A + bin_V$. Die gleichen *race model*-Tests wurden für die Stimuli ohne Modalitätswechsel durchgeführt, es wurden also nur Reaktionszeiten auf auditive Stimuli verwendet, die ihrerseits einen auditiven Stimulus zum Vorgänger hatten (A—A), nur visuelle Stimuli mit visuellem Vorgängerreiz (V—V) und bimodale Stimuli mit bimodalem Vorgängerreiz (AV—AV). Details dieses Vorgehens sind in Kapitel 2 erläutert. Besonderes Augenmerk lag auf dem Redundanzgewinn bei zentralen bimodalen Reizen, je nachdem, ob sich die Versuchsperson auf den zentralen Ort konzentrieren konnte (1. Durchgang, *fokussiert*) oder nicht (2. Durchgang, *verteilt*).

5.3 Experiment 1 – Ergebnisse

Tabelle 5.1a und b zeigt die Reaktionszeiten auf die einzelnen Stimuli in Bedingung *fokussiert*. Die Reaktionen auf die redundanten Reize waren deutlich schneller als auf die unimodalen Reize, der Redundanzgewinn betrug ca. 40 ms, wenn man die mittlere Reaktionszeit auf die auditiven Stimuli zum Vergleich heranzieht. Dieser Wert verringerte sich auf 24 ms, wenn nur Stimuli ohne Modalitätswechsel für die Auswertung

Tabelle 5.1: Mittlere Reaktionszeiten und Standardabweichung (in Klammern) für die beiden Aufmerksamkeitsbedingungen in Experiment 1

<i>a – Fokussierte Aufm., alle Stimuli</i>				<i>b – Fokussierte Aufm., ohne Wechsel</i>			
Stim.	links	zentral	rechts	Stim.	links	zentral	rechts
A		267 (49)		A		243 (40)	
V		288 (32)		V		266 (31)	
AV		227 (33)		AV		219 (36)	
RTE		40		RTE		24	

<i>c – Verteilte Aufm., alle Stimuli</i>				<i>d – Verteilte Aufm., ohne Wechsel</i>			
Stim.	links	zentral	rechts	Stim.	links	zentral	rechts
A	250 (45)	252 (46)	255 (46)	A	250 (47)	244 (47)	247 (44)
V	317 (45)	288 (47)	319 (42)	V	301 (40)	262 (44)	304 (39)
AV	236 (44)	228 (42)	238 (41)	AV	234 (38)	235 (46)	238 (46)
RTE	14	24	17	RTE	16	11	9

Anmerkungen.

RTE = kleinere der mittleren unimodalen Reaktionszeiten minus Reaktionszeit auf AV.
Fokussierte Aufmerksamkeit: Nur an der zentralen Position werden Reize dargeboten. Verteilte Aufmerksamkeit: Reize werden an allen drei Positionen dargeboten, in zufälliger Reihenfolge.

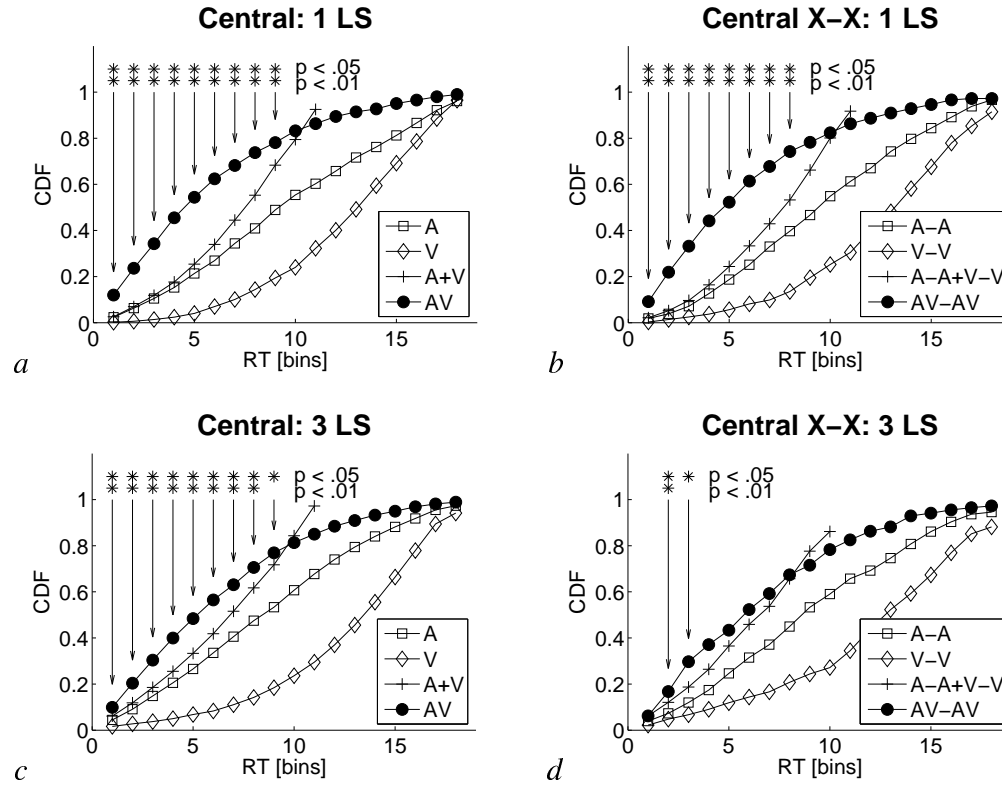


Abbildung 5.1: (a/b) *Race model*-Test für Bedingung *fokussiert* („1 LS“ = ein Lautsprecher). Der linke Test (a) bezieht sich auf alle Stimuli, im rechten Test (b) wurden nur Stimuli ohne Modalitätswechsel (X—X) verwendet. (c/d) *Race model*-Test für Bedingung *verteilt* („3 LS“) für Reaktionen auf zentrale Reize. Der linke Test (c) bezieht sich wiederum auf alle Stimuli, im rechten Test (d) wurden nur Stimuli ohne Modalitätswechsel verwendet.

verwendet wurden. Der *race model*-Test (Abb. 5.1a und b) zeigt entsprechend deutliche Koaktivierung an.

In der zweiten Versuchsbedingung (Tab. 5.1c und d, Abb. 5.1c und d), in der die Versuchspersonen auf Stimuli an drei Positionen achten mussten (*verteilt*), ergab sich ein ähnliches Bild: Der Redundanzgewinn betrug an der linken Position 14 ms, in der Mitte 24 ms und an der rechten Position 17 ms, wenn man jeweils die Reaktionszeit auf AV mit der niedrigeren unimodalen Reaktionszeit vergleicht. Wurden nur Stimuli ohne Modalitätswechsel betrachtet, lag der Redundanzgewinn bei 16 ms (links), 9 ms (Mitte) und 9 ms (rechts). Der *race model*-Test für die Reaktionszeiten am mittleren Lautsprecher zeigte schwache, aber an zwei *bins* signifikante, Koaktivierung an (Abb. 5.1c und d).

5.4 Experiment 1 – Diskussion

Im ersten Experiment der vorliegenden Teilstudie wurde der Einfluss der räumlichen Aufmerksamkeit auf den Redundanzeffekt bei zentral dargebotenen auditiv-visuellen Stimuli untersucht. Hierfür wurden zwei Bedingungen realisiert: In der ersten Bedingung (*fokussiert*) wurden nur Stimuli am zentralen Lautsprecher präsentiert, in der zweiten Bedingung (*verteilt*) wurden auditive, visuelle und redundante Reize an drei Lautsprechern (links, zentral, rechts) präsentiert. Es wurde angenommen, dass die Versuchspersonen ihre räumliche Aufmerksamkeit in Bedingung *fokussiert* auf den zentralen Lautsprecher richten, da nur dort Reize präsentiert wurden. In der verteilten Bedingung hingegen wurden Reize in nicht vorhersehbarer Reihenfolge an allen drei Orten präsentiert, entsprechend sollte die räumliche Aufmerksamkeit zumindest verringert sein. Nach dem *dimensional action model* (DA-Modell) von Cohen und Shoup (1997) ist räumliche Aufmerksamkeit für die Koaktivierung bei visuellen Stimuli unterschiedlicher Wahrnehmungsmodule notwendig. Feintuch und Cohen (2002) konnten dies für redundante visuelle Reize zeigen. Wenn das DA-Modell auch für die Integration von multisensorischen Reizen gilt, sollten in Bedingung *fokussiert* große Redundanzge-

winne aufgrund von Koaktivierung anfallen, weil sich die Versuchsperson auf den zentralen Lautsprecher konzentrieren kann. In der verteilten Bedingung sollten hingegen lediglich Redundanzgewinne nach dem *race model* verzeichnet werden, weil die Versuchsperson alle drei Lautsprecher beachten muss.

Die Ergebnisse stützen diese Annahme: Der Redundanzgewinn in Bedingung *verteilt* ist deutlich vermindert gegenüber Bedingung *fokussiert*. Auch die Verletzung des *race model* ist in der fokussierten Bedingung deutlich sichtbar, in der verteilten Bedingung hingegen geringer. Der signifikante Koaktivierungseffekt in Bedingung *verteilt* könnte zum einen Folge davon sein, dass die Versuchspersonen auch in dieser Bedingung in der Lage sind, den zentralen Lautsprecher zu beachten. Er könnte aber auch darin begründet sein, dass die Versuchspersonen in bestimmten Durchgängen auf den zentralen Lautsprecher achtet, z. B. wenn der Vorgängerreiz auch am zentralen Lautsprecher dargeboten wurde, in anderen nicht. Wechselkosten dieser Art wurden allerdings in Abbildung 5.1d kontrolliert: Die dort verwendeten Reaktionszeiten beziehen sich auf Stimuli mit gleichem Vorgängerreiz an der gleichen Position, das Ausmaß der Verletzung des *race model* ist trotzdem verringert im Vergleich zu Abbildung 5.1b.

Der geringere Koaktivierungseffekt in Abbildung 5.1 könnte aber auch einen anderen Grund haben: Für eine effektive Koaktivierung müssen die Informationen aus den Sinneskanälen etwa gleichzeitig an der Station der multisensorischen Integration „eintreffen“ (vgl. Bernstein et al., 1969; Diederich & Colonius, in press; Miller, 1986). An den Reaktionszeiten auf die unimodalen Reize kann man erkennen, dass sich die Verarbeitungszeit der auditiven Stimuli von der Verarbeitungszeit der visuellen Stimuli unterscheidet. Dieser Unterschied beträgt in der fokussierten Bedingung 21 ms (vgl. Tab. 5.1a), in der verteilten Bedingung beträgt er 36 ms (vgl. Tab. 5.1c, zentrale Stimuli). Der größere Unterschied in Bedingung *verteilt* könnte somit für den geringeren Koaktivierungseffekt verantwortlich sein. Um die unterschiedlichen Verarbeitungszeiten auszugleichen, schlugen Bernstein et al. (1969) vor, den auditiven Teilstimulus bei bimodalen Reizen später zu präsentieren. Miller (1986) beobachtete, dass der Koaktivierungseffekt bei einem Versatz von ca. 60 ms am höchsten ausfiel, exakt

dem beobachteten Unterschied zwischen den Reaktionszeiten auf auditive und visuelle Reize (vgl. auch Diederich & Colonius, in press). Das Experiment der vorliegenden Teilstudie wurde deshalb wiederholt, wobei für jede Versuchsperson ein Versatz aus dem Unterschied zwischen den Reaktionszeiten auf auditive und visuelle unimodale Reize berechnet wurde. Dieser Versatz wurde dann bei der Darbietung der bimodalen Reize verwendet.

5.5 Experiment 2 – Methode

Stichprobe

An Experiment 2 nahmen 14 Versuchspersonen teil. Es handelte sich zumeist um Studenten des Fachbereichs Psychologie der Universität Marburg (20–26 Jahre, 12 weibliche, 2 männliche Vpn). Die Teilnahme am Versuch war freiwillig und wurde für Studienzwecke bescheinigt bzw. mit 7 €/Stunde vergütet. Alle Versuchspersonen hörten und sahen normal (Selbstauskunft) bzw. trugen eine Brille.

Stimuli und Aufgabe

Stimuli und Aufgabe blieben unverändert gegenüber Experiment 1. Bedingung *fokussiert* wurden zwei Blöcke (1 × mit links reagieren, 1 × mit rechts reagieren) vorangestellt, in denen die Reaktionszeiten auf unimodale auditive und visuelle Stimuli bestimmt wurden. Die ermittelten Reaktionszeiten gingen nicht in die spätere Auswertung ein, sondern wurden verwendet, um den Versatz zwischen der Darbietung des visuellen und des auditiven Teilstimulus eines bimodalen Reizes zu bestimmen. In der verteilten Bedingung wurde gleichermaßen vorgegangen, zusätzlich wurde der Versatz nach jeweils zwei Blöcken erneut angepasst. Die mittleren Korrekturwerte sind in Tabelle 5.2 wiedergegeben.

Tabelle 5.2: Gemittelte SOAs in ms pro Bedingung in Experiment 2

<i>a – Fokussierte Aufmerksamkeit</i>				<i>b – Verteilte Aufmerksamkeit</i>			
Stim.	links	zentral	rechts	Stim.	links	zentral	rechts
A		36		A	81	78	67
V		0		V	5	28	12

Anmerkung.

SOA = Stimulus Onset Asynchrony, um wieviel der Reiz später präsentiert wurde – In (b) gibt es keine Null, denn die Werte wurden über die Versuchspersonen hinweg gemittelt, wobei manche Vpn links, manche rechts langsamer reagierten.

Datenauswertung

Kumulierte Häufigkeitsverteilungen der Reaktionszeiten auf die verschiedenen Stimuli wurden wie bei Corballis (2002) generiert. Die versetzte Darbietung wurde berücksichtigt, indem der verwendete Versatz zu den Reaktionszeiten auf unimodale (meist auditive) Stimuli addiert wurde und erst dann die Häufigkeitsverteilung gebildet wurde (Miller, 1986).

5.6 Experiment 2 – Ergebnisse

Abbildung 5.2 zeigt die *race model*-Tests für beide Bedingungen, jeweils für alle Stimuli sowie für die Stimuli ohne Modalitätswechsel (vgl. Kap. 2). Man kann erkennen, dass sich die Reaktionszeitverteilungen der unimodalen Reize jeweils stark überlappen. Dies kommt durch den verwendeten Versatz (SOA) zustande, der für jede Versuchsperson so angepasst wurde, dass die Reaktionszeiten auf den auditiven und visuellen Reiz in etwa gleich sind.

In Bedingung *fokussiert* wurde deutliche Koaktivierung beobachtet, in Bedingung *verteilt* hingegen folgten die Reaktionszeitverteilungen dem *race model*. Entsprechend

Tabelle 5.3: Mittlere Reaktionszeiten und Standardabweichung (in Klammern) für die beiden Aufmerksamkeitsbedingungen in Experiment 2

<i>a – Fokussierte Aufm., alle Stimuli</i>				<i>b – Fokussierte Aufm., ohne Wechsel</i>			
Stim.	links	zentral	rechts	Stim.	links	zentral	rechts
A		245 (30)		A		228 (31)	
V		278 (24)		V		258 (18)	
AV		211 (23)		AV		200 (23)	
RTE		34		RTE		28	

<i>c – Verteilte Aufm., alle Stimuli</i>				<i>d – Verteilte Aufm., ohne Wechsel</i>			
Stim.	links	zentral	rechts	Stim.	links	zentral	rechts
A	219 (32)	221 (30)	234 (31)	A	209 (27)	214 (29)	234 (30)
V	303 (31)	273 (32)	295 (31)	V	301 (40)	261 (28)	296 (41)
AV	198 (31)	202 (34)	209 (25)	AV	190 (40)	205 (53)	213 (29)
RTE	21	19	25	RTE	19	9	21

Anmerkungen.

RTE = kleinere der mittleren unimodalen Reaktionszeit minus Reaktionszeit auf AV.
 Fokussierte Aufmerksamkeit: Nur an der zentralen Position werden Reize dargeboten.
 Verteilte Aufmerksamkeit: Reize werden an allen drei Positionen dargeboten, in zufälliger Reihenfolge.

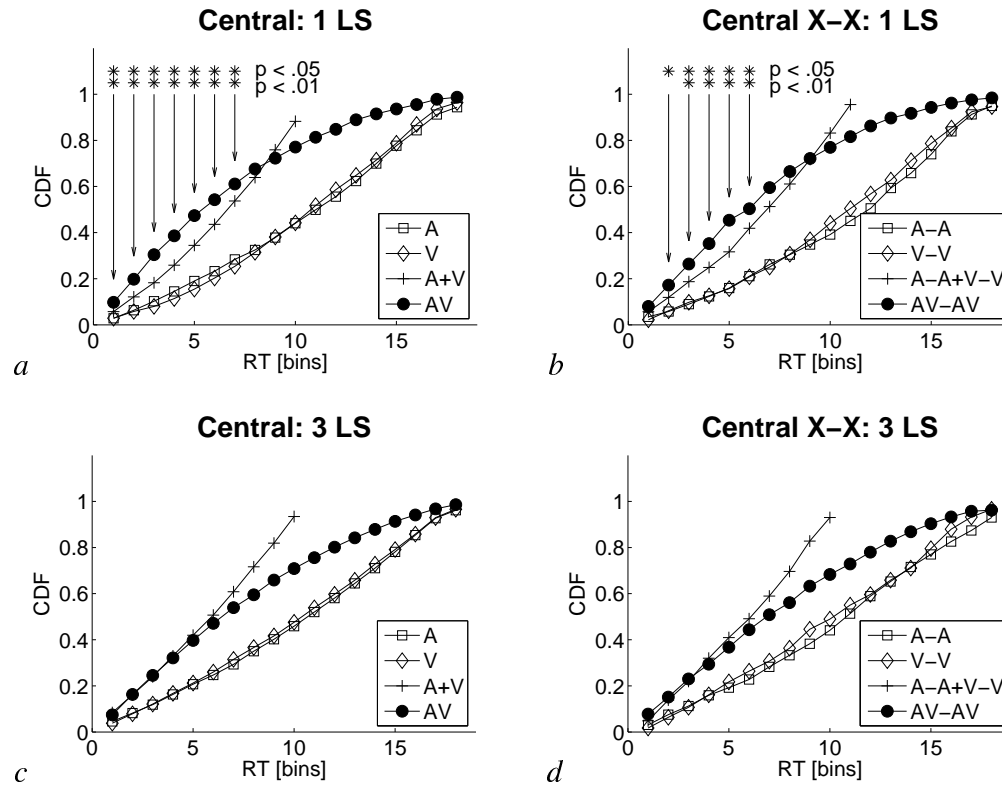


Abbildung 5.2: (a/b) *Race model*-Test für Bedingung *fokussiert* („1 LS“). Der linke Test (a) bezieht sich auf alle Stimuli, im rechten Test (b) wurden nur Stimuli ohne Modalitätswechsel verwendet. (c/d) *Race model*-Test für Bedingung *verteilt* („3 LS“) für Reaktionen auf zentrale Reize. Der linke Test (c) bezieht sich wiederum auf alle Stimuli, im rechten Test (d) wurden nur Stimuli ohne Modalitätswechsel verwendet.

lag der Reaktionszeitgewinn in der fokussierten Bedingung bei 34 ms, wenn die mittlere Reaktionszeit der redundanten Reize mit der mittleren Reaktionszeit des schnelleren Sinneskanals verglichen wurde. Wurden nur die Stimuli ohne Modalitätswechsel betrachtet, lag der Redundanzgewinn bei 28 ms. In der verteilten Bedingung lag der Redundanzgewinn beim zentralen Reiz bei 19 ms. Wurden hier nur wiederholte Stimuli (ohne Modalitätswechsel) verwendet, lag der Redundanzgewinn bei lediglich 9 ms. Tabelle 5.3 zeigt die mittleren Reaktionszeiten.

5.7 Diskussion

In der vorliegenden Teilstudie wurde untersucht, inwieweit räumliche Aufmerksamkeit die multisensorische Integration von redundanten auditiven und visuellen Reizen beeinflusst. Hierzu wurden zwei Bedingungen realisiert: In der ersten Bedingung (*fokussiert*) hatte die Versuchsperson die Aufgabe, auf auditive, visuelle und redundante Reize zu reagieren, die aus einem zentralen Lautsprecher mit integrierten LEDs dargeboten wurden. Es wurde angenommen, dass die Versuchsperson ihre Aufmerksamkeit in diesem Fall auf den Ort, an dem die Stimuli dargeboten wurden, richten konnte. In der zweiten Bedingung (*verteilt*) wurden auditive, visuelle und redundante Reize zusätzlich an einem links und an einem rechts platzierten Lautsprecher dargeboten. Die Annahme war, dass die räumliche Aufmerksamkeit reduziert ist, da die Versuchsperson nicht weiß, an welchem Ort der nächste Stimulus dargeboten wird. Das *dimensional action model* (DA-Modell, A. Cohen & Shoup, 1997) sagt – zumindest für visuelle Aufgaben (Feintuch & Cohen, 2002) – voraus, dass Koaktivierung nur dann beobachtet wird, wenn beide Reize im Fokus der visuellen Aufmerksamkeit liegen. Wenn das DA-Modell auch für die multisensorische Verarbeitung Gültigkeit hat, sollte entsprechend in der fokussierten Bedingung Koaktivierung beobachtet werden, in der verteilten Bedingung hingegen nur Redundanzgewinne nach dem *race model*.

Die Ergebnisse von Experiment 1 sprechen für diese Annahme. Wie in Abbildung 5.1a ersichtlich, zeigen die Reaktionszeitverteilungen in der fokussierten Be-

dingung einen deutlichen Koaktivierungseffekt. Dieser bleibt auch stabil, wenn Stimuli ausgeklammert werden, die von Modalitätswechselkosten betroffen sind (vgl. Abb. 5.1b). In Bedingung *verteilt* hingegen ist der Redundanzgewinn verringert (vgl. Abb. 5.1c). Wenn die Modalitätswechselkosten berücksichtigt werden (Abb. 5.1d), ist nur noch geringe Koaktivierung beobachtbar. Gleichwohl ist der Koaktivierungseffekt in Abbildung 5.1d signifikant, was u. U. darauf zurückgeführt werden kann, dass die Aufmerksamkeit auf den zentralen Lautsprecher in der verteilten Bedingung zwar verringert war, aber nicht völlig Null.

Um die unterschiedliche Verarbeitungsdauer auditiver und visueller Reize auszugleichen, wurden die auditiven Reize in Experiment 2 zeitlich versetzt präsentiert, damit die mittleren Reaktionszeiten auf auditive und visuelle Stimuli im bimodalen Reiz zusammenfallen (vgl. Bernstein et al., 1969; Diederich & Colonius, in press; Miller, 1986). Der notwendige Versatz wurde hierbei für jede Versuchsperson und jede Bedingung getrennt berechnet. Die Ergebnisse in Experiment 2 fielen hierdurch noch eindeutiger aus: Deutliche Koaktivierung in Bedingung *fokussiert* (Abb. 5.2a und b), lediglich *race model*-Effekte in Bedingung *verteilt* (Abb. 5.2c und d).

Das Modell von Cohen und Shoup (1997), das für die visuelle Wahrnehmung entwickelt wurde, wird damit von den Ergebnissen der vorliegenden Teilstudie bestätigt und kann u. U. auf multisensorische Wahrnehmungsprozesse verallgemeinert werden. Hierzu müssten z. B. Kongruenzeffekte bei *flanker tasks* untersucht werden, für die das DA-Modell ursprünglich entwickelt wurde. Weil es sich bei Sehen und Hören um unabhängige Wahrnehmungsdimensionen handelt (Treisman, 1969), sollten z. B. Reaktionen auf visuelle Zielreize von auditiven Disktraktoren vergleichsweise wenig beeinträchtigt werden. So allgemein formuliert, muss diese Annahme zurückgewiesen werden: Bei visuellen Klassifikationsaufgaben mit auditiven Distraktorreizen werden fast immer Kongruenzeffekte beobachtet und umgekehrt (Bernstein & Edelstein, 1971; Melara & O'Brien, 1987, eine Übersicht gibt Marks, 2004). Im DA-Modell werden Antwortkonflikte über die räumliche Aufmerksamkeit gelöst, mit deren Hilfe die Antworttendenz auf den beachteten Stimulus höher gewichtet wird. Eine geeignete Klassi-

fikationsaufgabe müsste diesen Aspekt berücksichtigen, also z. B. visuelle Disktraktorreize in der Peripherie präsentieren, während die Versuchsperson eine zentrale auditive Aufgabe bearbeitet. Unabhängig von der räumlichen Aufmerksamkeit hängen Kongruenzeffekte bei crossmodalen Klassifikationsaufgaben durchaus von der räumlichen Beziehung zwischen Ziel- und Distraktorreiz ab (Soto-Faraco, Lyons, Gazzaniga, Spence & Kingstone, 2002).

Ist die räumliche Aufmerksamkeit im DA-Modell von Cohen und Shoup (1997) modalitätsspezifisch? Ist der beobachtete Koaktivierungseffekt in der fokussierten Bedingung abhängig von der räumlichen Aufmerksamkeit als solche, oder kommt es in erster Linie auf die Fokussierung der *visuellen* Aufmerksamkeit an? Räumliche Aufmerksamkeit scheint ein relativ einheitliches System zu sein. Es scheint z. B. nicht möglich zu sein, sich gleichzeitig visuell nach links hin und auditiv nach rechts hin zu orientieren (Eimer, 1999). Untersuchungen mit ereigniskorrelierten Potentialen zeigen zum einen, dass die Ausrichtung der visuellen Aufmerksamkeit auf eine Position auch die Verarbeitung von auditiven Reizen an dieser Position beeinflusst (Hillyard et al., 1984). Dies muss aber nicht bedeuten, dass der Radius des aufmerksamskeitsbedingten „Scheinwerfers“ in beiden Modalitäten gleich groß sein muss: Dies ist schon deshalb unwahrscheinlich, weil die räumliche Auflösung des auditiven Systems wesentlich geringer ist als diejenige des visuellen Systems (Teder-Sälejärvi, Hillyard, Röder & Neville, 1999).

Hinweise hierauf liefern die Ergebnisse einer Pilotuntersuchung (Ghaffari & Gondan, unveröff.), in der zwei weitere experimentelle Bedingungen realisiert wurden: In der einen Bedingung (Abb. 5.3a) wurden zusätzlich zu den zentralen auditiven, visuellen und redundanten Reizen (wie in Bedingung „fokussiert“) auditive Stimuli an den Seitenlautsprechern präsentiert. In der anderen Bedingung (Abb. 5.3b) wurden zusätzlich zu den zentralen Reizen visuelle Stimuli aus den Seitenlautsprechern präsentiert. Wie in Abbildung 5.3 ersichtlich, ist in beiden Bedingungen ein deutlicher Koaktivierungseffekt erkennbar: Er ist allerdings in Abbildung 5.3a stärker ausgeprägt, d. h. wenn zusätzlich auditive Stimuli aus der Peripherie beachtet werden müssen, als in

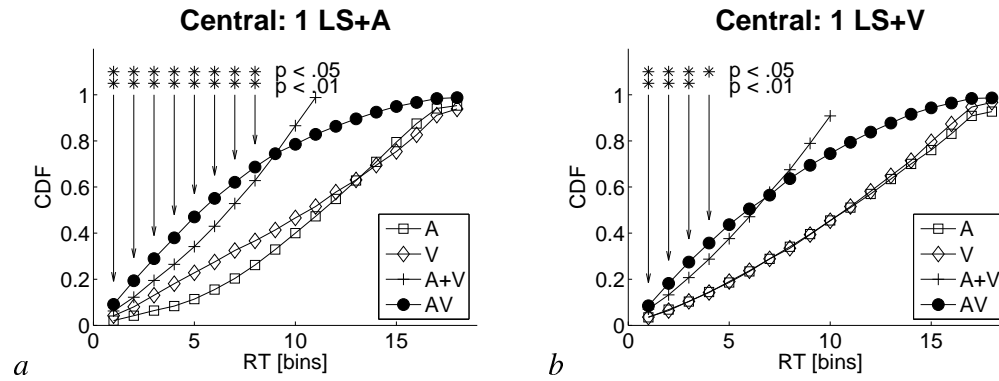


Abbildung 5.3: Ergebnisse einer Pilotuntersuchung, in der zusätzlich zu zentralen auditiven, visuellen und redundanten Reizen periphere auditive (a) und visuelle Stimuli (b) präsentiert wurden. Die Grafik zeigt nur die Reaktionszeitverteilungen für die zentralen Reize. Der Koaktivierungseffekt in (a) ist höher als in (b).

Abbildung 5.3b, wenn zusätzlich visuelle Stimuli aus der Peripherie beachtet werden sollen. Reduzierte räumliche Aufmerksamkeit scheint also eher eine *relative* Verringerung der Koaktivierung zu verursachen. Das Ausmaß dieser Verringerung ist stärker, wenn die Versuchsperson zusätzlich auf periphere Lichter achten muss, als wenn sie zusätzlich auf Töne achten muss.

6 Allgemeine Diskussion

Wenn eine Versuchsperson die Aufgabe hat, so schnell wie möglich auf auditive, visuelle und auditiv-visuelle Reize zu reagieren, beobachtet man deutlich schnellere Reaktionen auf die redundanten, auditiv-visuellen Reize (z. B. Miller, 1982). Ausgehend von diesem Befund wurden fünf Fragen formuliert und in separaten Teilstudien untersucht: In der ersten Teilstudie (Kap. 1, S. 21ff) wurde untersucht, wie dreifach redundante Reize verarbeitet werden. In der zweiten Teilstudie (Kap. 2, S. 35ff) wurde festgestellt, dass Redundanzgewinne durch Modalitätswechselkosten entstehen können und eine robuste Variante des *race model*-Tests vorgestellt. Multisensorische Interaktionen zwischen zwei Sinnessystemen wurden bisher mit bildgebenden Verfahren untersucht, indem das bimodal evozierte Potential (oder fMRI, ERF, ...) mit der Summe der unimodal evozierten Potentiale verglichen wurde. In Kapitel 3 (S. 49ff) wurde gezeigt, dass dieses Verfahren fehlerhafte Ergebnisse liefern kann und eine alternative Vergleichsmethode vorgestellt. In Kapitel 4 (S. 67ff) wurde untersucht, inwiefern Redundanzgewinne von der räumlichen Beziehung der beiden Teilstimuli abhängen. Zusätzlich wurde eine Vergleichsmethode für ereigniskorrelierte Potentiale entwickelt, mit der die Verarbeitung räumlich kongruenter und inkongruenter Reize untersucht werden kann. In der letzten Teilstudie (Kap. 5, S. 97ff) wurde untersucht, inwiefern die Verarbeitung von redundanten Reizen – genauer: Koaktivierung bei redundanten Reizen – von räumlicher Aufmerksamkeit abhängig ist.

6.1 Diskussion der Teilstudien

Wie werden dreifach redundante, also auditiv-visuell-taktile Reize verarbeitet? Gibt es einen spezifisch trisensorischen Redundanzgewinn, oder lassen sich schnellere Reaktionszeiten auf trimodale redundante Reize auch mit *statistical facilitation* und bisensorischen Redundanzgewinnen erklären? Die Beantwortung dieser Frage liefert Hinweise, auf welcher Ebene die Informationen des auditiven, visuellen und taktilen Systems zusammenlaufen: Werden die Informationen aus dem Seh-, Hör- und Tastsystem jeweils paarweise verknüpft (Abb. 6.1a), oder werden die Informationen der drei Systeme an einer zentralen Instanz integriert (Abb. 6.1b)?

In Kapitel 1 (S. 21ff, vgl. Gondan & Röder, 2004a, submitted) wurde zunächst

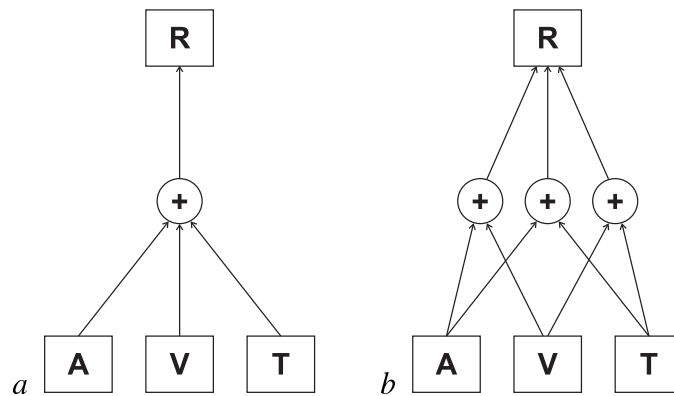


Abbildung 6.1: Zwei Modelle der Integration von trimodalen Reizen. (a) Die Informationen aus den drei Sinnessystemen (A, V, T) werden an einer zentralen Station der kognitiven Verarbeitung integriert (+). Diese Station profitiert von redundanten Informationen, wodurch schnellere Reaktionen (R) ausgelöst werden. In diesem Modell ist ein spezifisch trisensorischer Koaktivierungseffekt möglich. (b) Die Informationen aus den einzelnen Sinnessystemen werden jeweils paarweise an verschiedenen Stellen integriert. In (b) ist lediglich bisensorische Koaktivierung möglich.

in einer Simulation gezeigt, dass das von Diederich (1992) vorgeschlagene Verfahren zur Testung von trisensorischen Interaktionen die „wahren“ trisensorischen Koaktivierungseffekte überschätzt. Daraufhin wurde eine alternative Methode vorgestellt (Gl. 1.5), mit der spezifisch trisensorische Koaktivierungseffekte bei trimodalen Reizen nachgewiesen werden können. Mit dem neuen Verfahren wurden Redundanzgewinne bei Reaktionen auf trimodale Reize untersucht und es zeigte sich, dass Reaktionen auf trimodale redundante Reize nochmals schneller waren als Reaktionen auf bimodale redundante Reize. Der Redundanzgewinn bei trimodalen Reizen ließ sich jedoch vollständig auf bisensorische Koaktivierung zurückführen, ein spezifischer Gewinn durch die trimodale Stimulation wurde nicht beobachtet (Abb. 1.4d, S. 32). Die Abwesenheit eines trisensorischen Koaktivierungseffekts schließt trisensorische Interaktionen jedoch nicht aus, denn der *race model*-Test kann Koaktivierung nur nachweisen, nicht widerlegen. Spezifische Redundanzgewinne durch die trimodale Stimulation scheinen aber hierbei nicht anzufallen (vgl. Abb. 6.1b).

Dieses Ergebnis sollte allerdings noch in weiteren Untersuchungen untermauert werden, denn die Versuchsanordnung in Kapitel 1 war gezielt so gestaltet, dass trisensorische Interaktionen verhindert werden sollten: Der taktile Reiz wurde am rechten Zeigefinger dargeboten, räumlich getrennt vom visuellen und auditiven Stimulus, und außerhalb des Fokus der räumlichen Aufmerksamkeit. Dieses Vorgehen wurde gewählt, um den EKP-Vergleich in Kapitel 3 zu rechtfertigen, der nur dann eindeutig interpretierbare Ergebnisse liefert, wenn keine trisensorischen Interaktionen beobachtbar sind. Will man trisensorische Interaktionen genauer untersuchen, sollten die räumliche Beziehung der Stimuli (vgl. die Teilstudie in Kap. 4), der zeitliche Versatz bei der Darbietung der Stimuli und die Intensität der Teilstimuli jeweils systematisch variiert werden (z. B. Bernstein, 1970; Diederich & Colonius, in press; Meredith & Stein, 1987; Stein, 1998). Einen Überblick über die vielfältigen neuronalen Verschaltungen zwischen dem auditiven, visuellen und somatosensorischen System geben Schroeder und Foxe (2004) und Stein, Yiang und Stanford (2004).

In einer Sequenz von unimodalen auditiven und visuellen Reizen kostet ein Wech-

sel der Modalität Zeit (R. Cohen & Rist, 1992; Spence et al., 2001). Sind Redundanzgewinne bei bimodalen Reizen gar nicht Folge von *schnelleren* Reaktionen auf bimodale Reize, sondern womöglich Folge von *langsameren* Reaktionen auf unimodale Reize? In Kapitel 2 (S. 35ff, vgl. Gondan et al., 2004) wurden Modalitätswechselkosten in Reizsequenzen mit uni- und bimodalen auditiv-visuellen, auditiv-taktilen und visuell-taktilen Stimuli untersucht. Es wurde argumentiert, dass v. a. Reaktionen auf unimodale Reize von Modalitätswechseln betroffen sind, denn bei bimodalen Reizen entspricht ja immer zumindest eine Stimuluskomponente dem Vorgängerreiz. In einer Simulation wurde gezeigt, dass hierdurch ein Koaktivierungseffekt erzeugt werden kann, selbst wenn die Reaktionszeiten unter Annahme eines *race model* generiert werden (Abb. 2.1, S. 38). Zur Lösung dieses Problems wurde vorgeschlagen, für den *race model*-Test nur wiederholte Stimuli (Stimuli mit dem selben Vorgängerreiz und damit ohne Modalitäts-

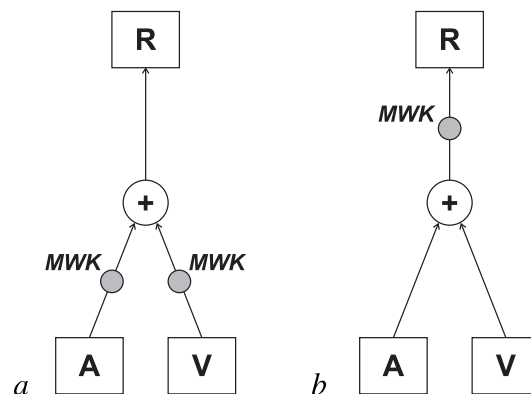


Abbildung 6.2: Modalitätswechselkosten (MWK) in randomisierten Stimulussequenzen von unimodalen (A, V) und bimodalen Reizen (AV). (a) Wechselkosten fallen v. a. bei unimodalen Reizen an, wenn z. B. auditiver Reiz nach einem visuellen Reiz dargeboten wird. (b) Wechselkosten sind bei allen drei Stimulusklassen (A, V, AV) beobachtbar, auch der Wechsel von A nach AV verursacht in diesem Modell Kosten. Die Ergebnisse der Teilstudie in Kapitel 2 sprechen eher für Variante (a).

wechsel) oder nur Stimuli mit festgelegten Vorgängerreiz (z. B. Stimuli mit auditivem Vorgängerreiz) zu verwenden.

An empirischen Reaktionszeiten wurde gezeigt, dass tatsächlich ein Teil des Redundanzeffekts auf Modalitätswechselkosten zurückgeführt werden kann. Wurden nur wiederholte Stimuli (ohne Modalitätswechselkosten) in die Datenauswertung aufgenommen, konnten gleichwohl deutliche Koaktivierungseffekte bei auditiv-visuellen, auditiv-taktilen und visuell-taktilen Reizen nachgewiesen werden. Wie vermutet, waren Modalitätswechselkosten im Wesentlichen auf unimodale Stimuli beschränkt. Dies weist darauf hin, dass sie an einer frühen Station der Stimulusverarbeitung anfallen, bevor etwa bimodale Reize zu einem integrierten Perzept verarbeitet werden (Abb. 6.2a). Da Modalitätswechselkosten v. a. dann beobachtet werden, wenn die Versuchsperson Einfachreaktionen auf alle dargeboteten Stimuli ausführen soll (Rist & Cohen, 1987), wurde die hier vorgeschlagene modifizierte Auswertungsmethode z. B. in Kapitel 5 verwendet, in der die Rolle der räumlichen Aufmerksamkeit auf Redundanzgewinne bei Einfachreaktionen auf auditive, visuelle und bimodale Reize untersucht wurde.

In Kapitel 3 (S. 49ff, vgl. Gondan & Röder, 2004a) wurde eine neue Methode zur Untersuchung bisensorischer Interaktionen mit ereigniskorrelierten Potentialen (EKPs) vorgestellt, die auch in der Magnetencephalographie und in der funktionellen Magnetresonanztomographie eingesetzt werden kann. Die neue Methode baut auf der Logik von Barth et al. (1995, vgl. auch Berman, 1961) auf, Wechselwirkungen zwischen dem auditiven und dem visuellen System durch den Vergleich des bimodal evozierten Potentials (AV) mit der Summe der unimodal (A, V) evozierten Potentiale zu bestimmen: $AV - (A + V)$. Diese Vorgehensweise wurde von Teder-Sälejärvi et al. (2002) kritisiert, da die Subtraktion zweier EKPs von einem EKP streng genommen erfordert, dass A, V und AV frei von jeglicher gemeinsamer Aktivität sind (Beispiel: CNV, *contingent negative variation*, die die Erwartung des nächsten Reizes widerspiegelt). Diese Aktivität wird durch die doppelte Subtraktion zweimal abgezogen und kontaminiert dadurch das Ergebnis. Dieses Problem wurde bisher entweder ignoriert (Foxe et al., 2000; Molholm et al., 2002; Murray et al., in press), oder es wurde argumentiert, dass das EKP

bis 200 ms nach Stimulusdarbietung keine gemeinsame Aktivität enthält (Besle et al., 2004; Fort & Giard, 2004; Giard & Peronnet, 1999), oder es wurde versucht, die niedrigfrequenten Anteile, z. B. der CNV, mit einem Hochpassfilter zu eliminieren (Teder-Sälejärvi et al., 2002).

Im neuen EKP-Vergleich (Gl. 3.5, S. 53) werden zwei EKPs von zwei anderen abgezogen: $(T + TAV) - (TA + TV)$. Es wurde gezeigt, dass mit diesem Vergleich zumindest formal gleichermaßen Wechselwirkungen des auditiven und visuellen Systems bestimmt werden können. Da die gemeinsame Aktivität durch die Symmetrie des Subtraktionsterms (2 Minuenden und 2 Subtrahenden) eliminiert wird, können mit Gleichung 3.5 auch anspruchsvollere experimentelle Paradigmen untersucht werden, bei denen Versuchsperson z. B. eine motorische Reaktion auf die Stimuli ausführen muss. In einem einfachen Detektionsexperiment mit uni-, bi- und trimodalen Reizen lieferten beide Vergleichsmethoden $[AV - (A + V)]$ und $(T + TAV) - (TA + TV)$ ähnliche Ergebnisse innerhalb der ersten 200 ms nach Stimulusdarbietung. Später, um 300 ms, fiel $(T + TAV) - (TA + TV)$ auf Null zurück, wohingegen in $AV - (A + V)$ nach ca. 300 ms eine „negative“ P3 sichtbar wurde, weil zwei P3-Wellen von einer abgezogen wurden. Mit der neuen Methode wurde eine erste multisensorische Interaktion ca. 100 ms nach Stimulusdarbietung beobachtet, also an einer verhältnismäßig frühen Stufe der kognitiven Verarbeitung. Die Wechselwirkung trat insbesondere auf, bevor die Versuchsperson erkennen konnte, ob es sich beim dargebotenen Stimulus um einen kritischen Zielreiz handelte. Spezifische Informationen über die Beschaffenheit des Stimulus wurden hier also noch nicht ausgetauscht. Nickerson (1973) zufolge wäre diese Wechselwirkung daher eher *preparation enhancement* zuzuordnen.

Am neuen EKP-Vergleich muss allerdings Folgendes kritisch angemerkt werden: $(T + TAV) - (TA + TV)$ ist zwar robust gegenüber gemeinsamer Aktivität in den beteiligten EKPs, nicht gelöst wird aber ein Problem, das durch die unterschiedlichen Verarbeitungszeiten der beteiligten Stimuli entsteht: Für den EKP-Vergleich wurden keine Zielreize verwendet, motorische Aktivität ist im Ergebnis daher nicht enthalten. Die unterschiedlichen Reaktionszeiten auf die kritischen Zielreize T, TAV, TA und TV

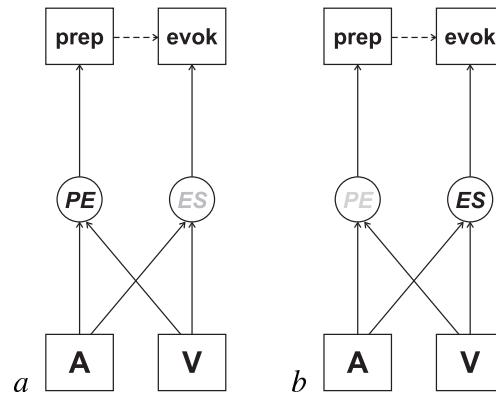


Abbildung 6.3: *Energy summation* (ES) und *preparation enhancement* (PE) im modifizierten Modell nach Nickerson (1973, S. 498, vgl. auch Abb. 0.3, S. 16). Das Modell wurde hier für redundante Reize erweitert. Beide Stimuli (A und V) aktivieren zum einen das Gesamtsystem, wodurch die Reaktionsbereitschaft steigt (prep, *prepare response*). Zum anderen tragen sie Informationen und lösen ggfs. eine Reaktion aus (evok, *evoke response*). Die frühe multisensorische Wechselwirkung in den EKPs (Kap. 3) ist eher PE zuzuordnen, denn 100 ms nach Stimulusdarbietung kann die Vpn noch nicht wissen, ob es sich bei dem Stimulus um einen Zielreiz handelt.

zeigen aber, dass sich die Verarbeitungszeiten der einzelnen Stimuli voneinander unterscheiden. Die späteren multisensorischen Interaktionen in $(T + TAV) - (TA + TV)$ könnten daher auch durch Latenzverschiebungen zustande kommen. Von diesem Problem ist auch die „klassische“ Subtraktionsmethode $AV - (A + V)$ betroffen. Ein erster Lösungsansatz könnte darin bestehen, die Latenzverschiebungen mit der *Microstates*-Methode (Pascual-Marqui, Michel & Lehmann, 1995) zumindest zu objektivieren, um die Gültigkeit späterer multisensorischer Interaktionen abschätzen zu können.

Der neue EKP-Vergleich kann allerdings nur globale Erkenntnisse über das Zusammenspiel von Hören und Sehen liefern: Es kann lediglich festgestellt werden, dass die Hirnantwort auf einen bimodalen Reiz nicht einfach der Summe der Hirnantworten

auf die unimodalen Reize entspricht. In Kapitel 4 (S. 67ff, vgl. auch Gondan et al., in press) wurde deshalb untersucht, ob die kortikale Verarbeitung von bimodalen Reizen durch die räumliche Beziehung der Stimuli beeinflusst wird. Hierfür wurden auditiv-visuelle Reize, bei denen Ton und Licht am selben Ort präsentiert wurden (AV links und AV rechts), mit auditiv-visuellen Reizen verglichen, bei denen Ton und Licht an unterschiedlichen Orten präsentiert wurden (A links/V rechts und V links/A rechts). Es zeigte sich, dass die Versuchspersonen von den räumlich kongruenten Reizen profitierten, also schneller reagierten als auf räumlich inkongruente Reize. Der Vergleich der EKPs der räumlich kongruenten Reize mit den EKPs der räumlich inkongruenten Reize $(A_L V_L + A_R V_R) - (A_L V_R + A_R V_L)$ zeigte eine Positivierung an parietalen Elektroden an, beginnend ca. 150 ms nach Stimulusdarbietung. Mit modifizierten EKP-Vergleichen (Abb. 4.8, S. 89) konnte gezeigt werden, dass diese Positivierung auf den jeweils kontralateralen räumlich kongruenten Stimulus zurückgeführt werden kann.

Es zeigte sich allerdings auch, dass der Koaktivierungseffekt bei der Verarbeitung von redundanten auditiv-visuellen Reizen nur wenig mit dem Antwortverhalten der Neurone im Colliculus superior gemeinsam hat. Während Zellantworten im Colliculus superior in hohem Maße von der räumlichen Beziehung der Reizkomponenten beeinflusst werden (*response enhancement* bei räumlich kongruenten Reizen, *response depression* bei räumlich inkongruenten Reizen, vgl. Abschnitt 0.6 und Meredith & Stein, 1987), führten räumlich kongruente Reize im Vergleich zu räumlich inkongruenten Reizen lediglich zu geringfügig schnelleren Reaktionszeiten. Reaktionen auf seitengleiche Reize waren nur ca. 5 ms schneller als auf gegenüberliegende Reize, und Koaktivierung wurde auch bei gegenüberliegenden Reizen beobachtet. Die eingangs formulierte Vermutung, dass Koaktivierung von räumlicher Kongruenz abhängig sein soll, muss daher zurückgewiesen werden. Auch die Zuordnung des Koaktivierungseffekts zu einzelnen Hirnregionen ist schwierig, denn in allen Bedingungen von Kapitel 3 und 4 trat Koaktivierung auf. Hinweise auf eine spezifische Beteiligung kortikale Strukturen am Redundanzeffekt würde man dann erhalten, wenn sich der Koaktivierungseffekt in Bedingung A gezeigt hätte und in Bedingung B nicht. Es kann aller-

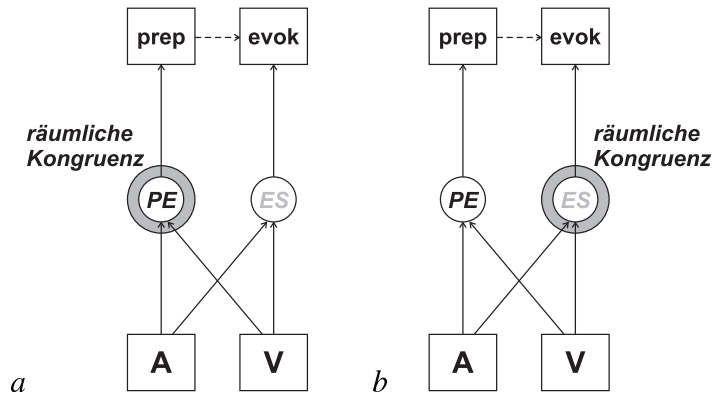


Abbildung 6.4: In Kapitel 4 wurde u. a. untersucht, ob räumliche Kongruenz und Reaktionsrelevanz interagieren: Profitiert die Vpn grundsätzlich von räumlich kongruenten Reizen, spricht dies für erhöhtes *preparation enhancement* (a). Profitiert sie nur dann von räumlich kongruenten Reizen, wenn die Reize die gleiche Reaktion erfordern, spricht dies für spezifische intersensorische Wechselwirkungen (*energy summation*, ES). Die Ergebnisse sprechen für Variante (a), der Einfluss von ES scheint zudem insgesamt eher gering.

dings festgehalten werden, dass die frühen multisensorischen Wechselwirkungen in Kapiteln 3 und 4 auftraten, bevor die Versuchspersonen die Möglichkeit hatten, die Zielreize zu identifizieren. Die beobachteten EKP-Effekte scheinen mit der Verarbeitung der Reizinformation daher nichts zu tun zu haben.

Entsprechend fiel auch ein hoher Anteil des Redundanzgewinns unabhängig von der Antwortrelevanz der Stimuli an, denn auch Reaktionen auf nicht-redundante bimodale Reize (auditiver Zielreiz, visueller Standardreiz) waren schneller als auf die entsprechenden unimodalen Reize (auditiver Zielreiz alleine, Abb. 4.2, S. 80). Dieser Teil des Redundanzgewinns kann daher wiederum eher *preparation enhancement* zugeordnet werden. Räumliche Kongruenz verstärkte diesen Effekt, eine Wechselwirkung von räumlicher Kongruenz und Reaktionsrelevanz wurde nicht beobachtet (Abb. 6.4a). Wie

in Abbildung 4.4 ersichtlich, führten die redundanten Informationen in den redundanten Zielreizen zu Reaktionszeitgewinnen, die nur geringfügig über *statistical facilitation* hinausgingen. Der Einfluss von *energy summation* war damit auch in der Teilstudie in Kapitel 4 eher gering. Die Ergebnisse von Kapitel 4 entsprechen in diesem Sinne wiederum den Vermutungen Nickersons (1973).

In Kapitel 5 (S. 97ff, vgl. Gondon & Röder, 2004b) wurde untersucht, ob die Redundanzgewinne bei auditiv-visuellen redundanten Reizen von der Fokussierung der räumlichen Aufmerksamkeit auf den Ort der Stimulation abhängen. Hierfür wurden auditive, visuelle und bimodale Reize an drei Positionen präsentiert (links, Mitte, rechts). Im ersten Durchgang wurden Stimuli nur an der mittleren Position präsentiert, die Versuchspersonen konnten ihre räumliche Aufmerksamkeit entsprechend auf die Reize richten. Bimodale Reize führten hier zu einem deutlichen Redundanzgewinn, der nur durch ein Koaktivierungsmodell erklärt werden konnte. Im zweiten Durchgang

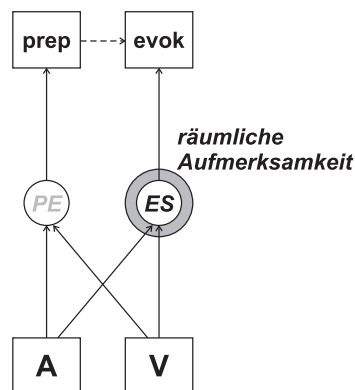


Abbildung 6.5: Koaktivierung bei redundanten auditiv-visuellen Reizen ist von räumlicher Aufmerksamkeit beeinflusst. Nach dem Modell von Cohen und Shoup (1997) und Feintuch und Cohen (2002) ist räumliche Aufmerksamkeit Voraussetzung für die Integration der Informationen, die die beiden Teilstimuli tragen. Sie wurde daher der *energy summation* zugeordnet.

wurden Stimuli in zufälliger Folge an allen drei Positionen dargeboten, entsprechend musste die Versuchsperson alle drei Positionen beachten. In diesem Durchgang war der Redundanzgewinn auch an der zentralen Position deutlich verringert. Dies zeigte sich auch in der Replikation des Experiments, in der die auditiven und visuellen Stimuli versetzt dargeboten wurden, um die unterschiedlichen Reaktionszeiten auf auditive und visuelle Reize auszugleichen. Dass Koaktivierung von räumlicher Aufmerksamkeit beeinflusst wird, entspricht der Vorhersage des *dimensional action models* (DA-Modell) von Cohen und Shoup (1997) und Feintuch und Cohen (2002). Das DA-Modell baut auf der *feature integration theory* (FIT) von Treisman und Gelade (1980) auf, auch in der FIT wird die Rolle der räumlichen Aufmerksamkeit für die Integration von „features“ (hier entsprechend: von auditiven und visuellen Zielreizen) betont. DA-Modell und FIT beziehen sich auf die Integration von Informationen der visuellen Szene, die Ergebnisse der Teilstudie in Kapitel 5 weisen darauf hin, dass die Theorien auch auf Koaktivierungsprozesse bei multisensorischen Reizen anwendbar sind (Abb. 6.5).

6.2 Schlussfolgerungen

Aus der Literatur und aus den Ergebnissen der fünf Teilstudien ergeben sich Hinweise auf eine Reihe von Mechanismen, die für die schnelleren Reaktionen auf redundante bimodale Reize verantwortlich sind: *statistical facilitation* (SF, Raab, 1962), Modalitätswechselkosten (Kap. 2), *preparatory enhancement* (Nickerson, 1973, Kap. 3 und 4), räumliche Kongruenzeffekte (Kap. 4) und *energy summation* (Nickerson, 1973, Kap. 4 und 5). *Statistical facilitation* ist in nahezu allen Untersuchungen mit redundanten Reizen wirksam. Durch *statistical facilitation* werden die Reaktionen auf redundante Reize nicht schneller, vielmehr steigt lediglich der Anteil der schnellen Reaktionen auf redundante Reize. Dies liegt daran, dass die beiden Teilstimuli eines redundanten Reizes jeweils eigene (gemeinsame oder getrennte) Verarbeitungsprozesse auslösen, an deren Ende eine Reaktion steht. Selbst wenn diese beiden Verarbeitungsprozesse komplett unabhängig voneinander ablaufen, steigt hierdurch die Wahrscheinlichkeit

für eine schnelle Reaktion, was im Endeffekt zu schnelleren mittleren Reaktionszeiten führt (vgl. Einleitung S. 7). Streng genommen handelt es sich bei *statistical facilitation* daher um keinen multisensorischen Integrationsmechanismus, sie muss aber bei der Untersuchung von Redundanzeffekten berücksichtigt werden (Miller, 1982).

Ähnlich verhält es sich mit Modalitätswechselkosten (MWK). MWK treten v. a. bei unimodalen Reizen auf, wenn eine Versuchsperson auf jeden dieser Reize entweder einfache (z. B. Spence et al., 2001, auch Kap. 2 und 5) oder komplexere Reaktionen (vgl. R. Cohen & Rist, 1992) ausführen muss, weniger bei Aufgaben, in denen nur Zielreize entdeckt werden sollen (Rist & Cohen, 1987, hier Kap. 1 und 4). Das „Problem“ mit MWK in Redundanzexperimenten liegt darin, dass ein Teil der unimodalen Stimuli einen Vorgängerreiz der anderen Modalität hat, bei den bimodalen Reizen hingegen immer mindestens ein Teilstimulus dem Vorgängerreiz entspricht. Die Reaktionen auf unimodale Reize werden also durch MWK gebremst, während die Reaktionen auf bimodale Reize relativ unbeeinträchtigt bleiben. Der Redundanzeffekt steigt hierdurch und es kommt zu einem scheinbaren Koaktivierungseffekt, auch wenn gar keine multisensorische Integration vorliegt (vgl. Simulation in Kap. 2).

Werden einer Versuchsperson uni- und bimodale Reize zweier Modalitäten dargeboten, z. B. auditive, visuelle und bimodale Reize (A, V, AV), und hat sie die Aufgabe, nur auf die visuellen Reize zu reagieren und die auditiven zu ignorieren, so beobachtet man häufig schnellere Reaktionen auf AV, obwohl es sich in diesem Fall gar nicht um redundante Reize handelt und auf A alleine gar nicht reagiert werden soll (Bernstein & Edelstein, 1971; Schmidt et al., 1984). Nickerson (1973) schlägt zwei Mechanismen vor zur Erklärung dieses Effekts vor, *energy summation* (ES) und *preparation enhancement* (PE). ES bedeutet, dass der bimodale Reiz als Stimulus von höherer Intensität fungiert; Stimuli mit höherer Intensität führen zu schnelleren Reaktionen. PE hingegen bedeutet, dass durch den zusätzlichen Reiz die *preparedness* des Gesamtsystems steigt und hierdurch schnellere Reaktionen ausgelöst werden. PE bezieht sich zwar auf alle Stationen der Stimulusverarbeitung, Nickerson argumentiert allerdings, dass spätere Stationen (*response execution*) eine höhere Chance haben, von PE zu profitieren als

frühe Stationen (Nickerson, 1973, S. 499).

Im Modell von Nickerson trägt die Aktivierung eines Stimulus entweder zum Aufbau der Reaktionsbereitschaft (PE-Kanal) oder zur Ausführung der Reaktion (ES-Kanal) bei, je nachdem, auf welchen Sinneskanal die Versuchsperson reagieren soll. Im Redundanzexperiment sind entsprechend beide Eingänge mit dem ES-Modul verbunden, wodurch zumindest *statistical facilitation* bei redundanten Reizen möglich wird. Auch Koaktivierung bei Einfachreaktionen könnte hiermit vereinbar sein, wenn man den Aufbau der Aktivierung als graduellen Poisson-Prozess auffasst und Superposition dieser Prozesse im ES-Modul annimmt (Schwarz, 1989). Die schnelleren Reaktionen auf nicht-redundante bimodale Reize im Redundanzexperiment (Kapitel 4, Kombinationen von einfachen Standard- und doppelten Zielreizen, AAV und AVV) können hiermit allerdings nicht erklärt werden. Da es sich um ein Redundanzexperiment handelt, sind beide Kanäle mit dem ES-Modul verbunden, PE sollte daher nicht auftreten. Da nur auf eine der beiden Reizkomponenten im nicht-redundanten Reiz AAV reagiert werden soll, also keinerlei Redundanzgewinne innerhalb des ES-Moduls anfallen können, stellt sich die Frage, warum die Reaktionen auf AAV und AVV trotzdem schneller sind als auf die unimodalen Zielreize AA und VV. Diese Beobachtung wird dann mit dem Modell von Nickerson vereinbar, wenn man zulässt, dass ein Wahrnehmungskanal gleichzeitig mit PE *und* ES verbunden sein kann, dass er also eine Reaktion auslösen kann und gleichzeitig die *preparedness* des Gesamtsystems erhöht wird. Lässt man diese Veränderung zu, kann man den Reaktionszeitgewinn bei den nicht-redundanten Reizen in Kapitel 4 mit PE erklären. PE scheint zudem bei räumlich kongruenten Reizen effektiver zu sein, zumindest waren die Reaktionen auf seitengleiche bimodale Reize in Kapitel 4 etwas schneller. Interpretiert man PE als stimulusinduzierten Alertness-Effekt,¹ kann man PE auch eine gewisse räumliche Fokussierung zubilligen (Näätänen et al., 1978).

Der Redundanzgewinn bei redundanten Zielreizen in Kapitel 4, der auf *energy*

¹Zur Erinnerung: Die Zielreize in Kapitel 4 waren Doppelreize, 70 ms Stimulus, 60 ms Pause, 70 ms Stimulus. Bis zum Onset des 2. Stimulus ist also mindestens 130 ms Zeit für den Aufbau von PE.

summation (ES) zurückgeführt werden kann, fiel eher gering aus, die schnelleren Reaktionen auf die redundanten Reize konnten größtenteils mit *statistical facilitation* erklärt werden (Abb. 4.4, S. 84). Die Integration der Stimulusinformationen scheint in Teilstudie 4 also eher begrenzt gewesen zu sein. Dies ist insofern mit Nickerson (1973) vereinbar, als basale ES bei einer Diskriminationsaufgabe wie in Kapitel 3 und 4 eigentlich keine Information über den Zielreiz liefert: Sowohl die Standardreize waren uni- oder bimodale Reize (A, V, AV) als auch die Zielreize (AA, VV, AAVV). Der Umstand, dass ein Reiz bimodal war, lieferte also keine Evidenz darüber, ob es sich bei dem Reiz um einen Zielreiz handelte, entsprechend gering war der Beitrag von ES.

Anders sah es in der letzten Teilstudie aus (Kap. 5): Hier hatte die Versuchsperson die Aufgabe, Einfachreaktionen auf alle uni- und bimodale Reize auszuführen, entsprechend war ES möglich. Der Hauptbefund in Kapitel 5 war, dass Koaktivierung stark durch räumliche Aufmerksamkeit beeinflusst werden konnte. Dies entspricht, wie bereits erwähnt, den Vorhersagen des *dimensional action models* (A. Cohen & Shoup, 1997). Cohen und Shoup wenden sich explizit gegen separierbare Verarbeitungsstufen (wie ES und PE). Stattdessen nehmen sie direkte *stimulus-response associations* an. Diese Assoziationen tragen reaktionsrelevante Informationen und sind koaktivierbar (Feintuch & Cohen, 2002), sie wären daher bei Nickerson (1973) eher ES zuzuordnen.

Überraschend an den Ergebnissen in Kapitel 5 ist, dass in der Bedingung, in der die Versuchspersonen alle drei Lautsprecher beachten musste, nur ein stark reduzierter (Exp. 1) bzw. gar kein (Exp. 2) Koaktivierungseffekt mehr zu beobachten war. Erlaubt man, wie oben vorgeschlagen, dass die Sinneskanäle sowohl mit dem PE-Modul als auch mit dem ES-Modul verbunden sind, sollte zumindest ein PE-bedingter Koaktivierungseffekt beobachtbar sein, vergleichbar mit den Befunden in Kapitel 4. Einfachreaktionen auf uni- und bimodale Reize sind allerdings wesentlich schneller als Go/Nogo-Reaktionen. Es könnte daher sein, dass für einen effektiven Aufbau von PE schlicht die Zeit fehlte (vgl. die Argumentation zum Thema *response execution* in Nickerson, 1973, S. 499); dies umso mehr, als die Stimuli in Experiment 2 in Kapitel 5 so dar-

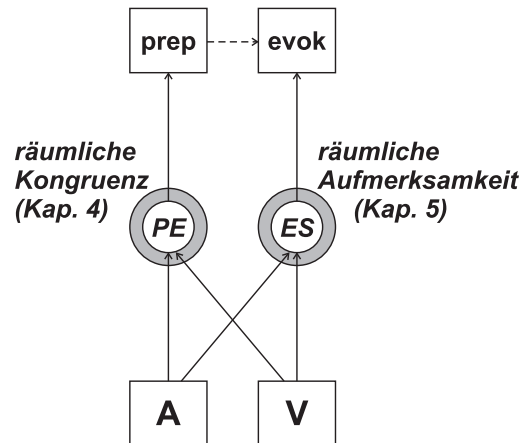


Abbildung 6.6: Multisensorische Integration von redundanten Reizen in einem modifizierten Modell nach Nickerson (1973). Zwei Mechanismen können unterschieden werden, *preparation enhancement* (PE) und *energy summation* (ES). PE wirkt durch die höhere Stimulusenergie bei bimodalen Reizen und führt zu einer generell höheren Aktivierung und effizienteren Reizverarbeitung (Kap. 3 und 4). Dieser Effekt wird durch räumliche Kongruenz der Reize verstärkt (Kap. 4). PE kommt in Einfachreaktionsaufgaben (wie z. B. in Kap. 5) u. U. deshalb nicht zur Wirkung, weil PE langsam wirkt und Einfachreaktionen schnell sind. Bei Diskriminationsaufgaben (Kap. 3 und 4) hingegen dauert die Entscheidung länger, „prep“ kann daher Einfluss auf „evok“ nehmen. ES hingegen kommt v. a. bei Einfachreaktionen ins Spiel und scheint von räumlicher Aufmerksamkeit abhängig zu sein (Kap. 5).

geboten wurden, dass die Reaktionszeiten der unimodalen Reize aufeinanderfielen. In Experiment 1 wurden die Stimuli hingegen gleichzeitig dargeboten. Hier wäre daher denkbar, dass der schneller verarbeitete auditive Reiz zumindest rudimentär als Warnsignal fungierte und zu PE beitrug. Entsprechend konnte in Experiment 1 von Kapitel 5 ein geringer Koaktivierungseffekt beobachtet werden.

Die Argumentation könnte auch erklären, warum bei Split-Brain-Patienten paradoxe Koaktivierung bei redundanten bilateralen visuellen Aufgaben beobachtet wird (Corballis, 1998; Corballis et al., 2002; Roser & Corballis, 2002; Reuter-Lorenz et al., 1995). *Energy summation* sollte bei getrennten Hemisphären eigentlich nicht stattfinden, wohl aber *preparation enhancement* (Corballis et al., 2002). Da die Reaktionszeiten der Split-Brain-Patienten – warum auch immer – in den zitierten Untersuchungen wesentlich länger waren als diejenigen der Normalpersonen, hätte *preparation enhancement* bei ihnen durchaus eine Chance gehabt, zur Vorbereitung der Reaktion beizutragen. Das modifizierte Modell ist in Abbildung 6.6 nochmals schematisch dargestellt.

6.3 Kortikale Mechanismen der multisensorischen Integration von redundanten Reizen

Aus den Teilstudien, in denen ereigniskorrelierte Potentiale abgeleitet wurden (Kap. 3 und 4), lassen sich Hinweise gewinnen, wie bimodale Reize kortikal verarbeitet werden. Die in den beiden Teilstudien referierten Befunde scheinen reliabel zu sein: Die Teilstudie in Kapitel 3 repliziert ähnliche Befunde von Giard und Peronnet (1999) und von Teder-Sälejärvi et al. (2002). Auch der räumliche Kongruenzeffekt (Kap. 4) wurde in einer Untersuchung von Teder-Sälejärvi et al. (in press) in ähnlicher Form beobachtet.

Wie in Abbildungen 3.3 und 6.7 ersichtlich, lieferten die beiden in Kapitel 3 untersuchten Subtraktionsmethoden $AV - (A + V)$ und $(T + TAV) - (TA + TV)$ zumindest innerhalb der ersten 200 ms nach Stimulusdarbietung ähnliche Ergebnisse.

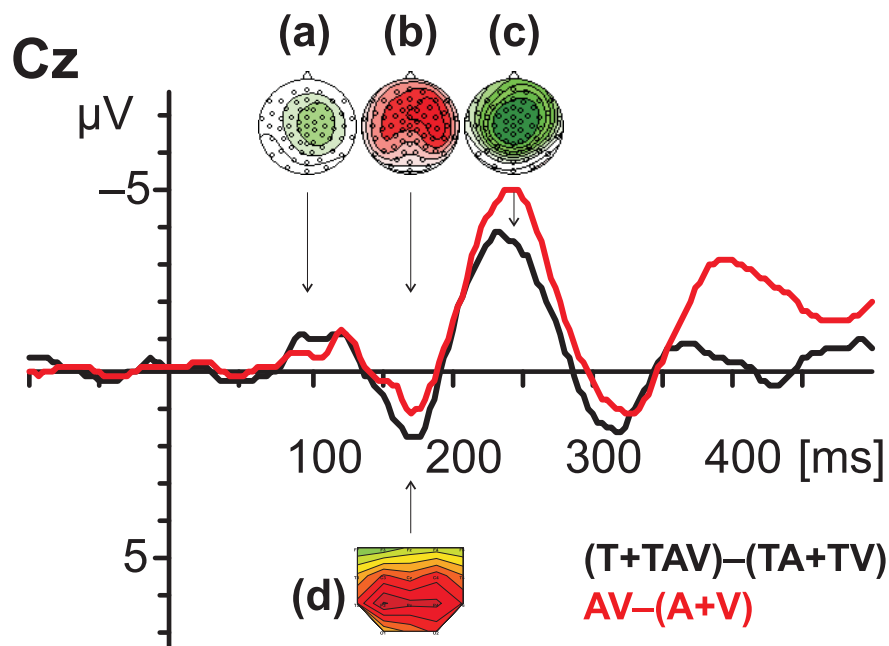


Abbildung 6.7: Multisensorische Interaktionen in den EKPs in Kapitel 3 (a–c) und räumlicher Kongruenzeffekt in den EKPs in Kapitel 4 (d). Etwa 100 ms nach Stimulusdarbietung (a) zeigt sich ein erster Effekt, der von Giard und Peronnet (1999) als erhöhte auditive N1 gewertet wird. Ab 150 ms zeigt sich eine breite Positivierung (b), die eine verringerte visuelle N1 widerspiegeln soll. Sie weist zudem Ähnlichkeiten mit dem räumlichen Kongruenzeffekt (d) in Kapitel 4 auf. Um 250 ms wird nochmals eine breite zentrale Negativierung sichtbar. Die späteren multisensorischen Interaktionen sollten allerdings mit Vorsicht interpretiert werden, sie könnten Resultat von Latenzverschiebungen (vgl. hierzu S. 123) und im Falle von $AV - (A + V)$ auch P3-Artefakten sein.

Eine erste multisensorische Interaktion wurde ca. 100 ms nach Stimulusdarbietung über Cz beobachtet und repliziert ähnliche Befunde bei Giard und Peronnet (1999) und Teder-Sälejärvi et al. (2002, Abb. 6, S. 113). Teder-Sälejärvi et al. interpretierten diese frühe Interaktion als residuale CNV-Aktivität, die in $AV - (A + V)$ durch die doppelte Subtraktion entsteht und nicht vollständig durch den verwendeten Hochpassfilter entfernt wurde. Giard und Peronnet (1999) beobachteten um 100 ms eine temporo-zentrale Negativierung mit Polaritätsumkehr am Mastoiden. Sie interpretierten diese Wechselwirkung im Sinne einer erhöhten auditiven N1 beim bimodalen Reiz. Diese Interpretation bietet sich auch in der vorliegenden Arbeit an, da die „auditive“ N1 des bimodal evozierten Potentials ebenfalls eine höhere Amplitude als die summierten unimodal evozierten Potentiale hatte. Dies wurde mit beiden Vergleichsmethoden beobachtet, $AV - (A + V)$ und $(T + TAV) - (TA + TV)$. Die veränderte Topographie im Vergleich zu Giard und Peronnet kommt u. U. durch die unterschiedliche Referenz zustände (Kap. 3: mittlerer Signalverlauf der beiden Mastoidelektroden, Giard & Peronnet: Nase).

Eine zweite Interaktion wurde ab ca. 150 ms beobachtet (Abb. 3.3b und 6.7b), mit breiter positiver temporoparietaler Topographie. Diese Interaktion repliziert ebenfalls ähnliche Befunde bei Giard und Peronnet (1999, ab 155 ms) und bei Teder-Sälejärvi et al. (2002). Giard und Peronnet interpretieren diese Interaktion als Verminderung der visuellen N1 (Busch, Wilson, Orr & Papanicolaou, 1989; Giard & Peronnet, 1999). Die visuelle N1 wird in höheren visuellen extrastriären Arealen im Okzipitalkortex generiert (Foxe & Simpson, 2002; Mangun, 1995) und spiegelt u. a. die Ausrichtung der visuellen Aufmerksamkeit auf den Stimulus wider (Luck, Heinze, Mangun & Hillyard, 1990). Eine Dipol-Analyse dieser zweiten Wechselwirkung erbrachte tatsächlich Hinweise auf eine inferiore parieto-okzipitale Quelle (Teder-Sälejärvi et al., 2002). In diesem Sinne wäre die Verringerung der visuell evozierten N1 im Sinne einer verringerten visuellen Aufmerksamkeitszuwendung beim bimodalen Reiz zu werten.

Ob diese Verminderung einen Ressourcenkonflikt ausdrückt (die auditive N1 ist ja im bimodalen Reiz erhöht) oder ob sie die erleichterte Verarbeitung auditiv-visueller

redundanter Reize widerspiegelt (so die Vermutung bei Giard & Peronnet, 1999), muss offen bleiben. Die Frage nach dem Ressourcenkonflikt ließe sich u. U. mit modifizierten Darbietungszeiten für den auditiven und visuellen Teilstimulus beantworten: Reaktionen auf auditive Reize sind ja i. d. R. schneller als Reaktionen auf visuelle Reize. Interessant wäre z. B. zu untersuchen, ob sich dieses Muster (erhöhte auditive N1, verringerte visuelle N1) ausgleicht oder umkehrt, wenn die auditiven Stimuli so versetzt dargeboten werden, damit der Reaktionszeitunterschied ausgeglichen wird. Hier auf wird im folgenden Abschnitt noch eingegangen.

Die späte zentrale Interaktion um 250 ms (Abb. 3.3c und 6.7c) repliziert die zweite Interaktion bei Teder-Sälejärvi et al., die den zugehörigen Dipol im anterioren temporalen Assoziationskortex bzw. in polymodalen Arealen des *planum temporale superior* lokalisierten. Hier konvergieren visuelles, auditives und taktils System in *feed forward*-Schleifen (Schroeder & Foxe, 2002).

Interessanterweise ähneln Polarität und Latenz der zweiten Interaktion (ab 150 ms, Abb. 6.7b) dem EKP-Hauptbefund der Teilstudie in Kapitel 4, in der räumlich kongruente bimodale Reize (AV links, AV rechts) direkt mit räumlich inkongruenten bimodalen Reizen (A links/V rechts, V links/A rechts) verglichen wurden (Abb. 4.7 auf S. 87 und 6.7d). In Kapitel 4 wurde argumentiert, dass diese parietale Positivierung eine spezifische kortikale Reaktion auf den räumlich kongruenten Reiz darstellt. Dieser räumliche Kongruenzeffekt ist in $AV - (A + V)$ implizit enthalten, denn in allen drei betrachteten Studien (Kap. 3; Giard & Peronnet, 1999; Teder-Sälejärvi et al., 2002) wurden räumlich kongruente auditiv-visuelle Reize verwendet. Man könnte daher vermuten, dass die zweite Interaktion in Kapitel 3 und der räumliche Kongruenzeffekt in Kapitel 4 auf den gleichen Mechanismus verweisen, nämlich die Detektion und Verarbeitung räumlich kongruenter Reize. Giard und Peronnet argumentieren, dass die Interaktion um 175 ms in $AV - (A + V)$ die Verringerung der visuellen N1 bei bimodalen Reizen widerspiegelt. Akzeptiert man diese Interpretation, dann würde die weitere Positivierung bei räumlich kongruenten Reizen bedeuten, dass diese N1-Verringerung noch deutlicher ausgeprägt ist, wenn die beiden Teilstimuli am gleichen Ort präsentiert

werden.

6.4 Offene Fragen und Ausblick

Die fünf Teilstudien lieferten jeweils Antworten auf spezifische Fragestellungen rund um das Thema multisensorische Integration von redundanten Reizen. Vieles blieb hierbei unbeantwortet und die Experimente selbst warfen z. T. eher neue Fragen auf, als dass sie die ursprünglichen Fragestellungen beantwortet hätten. Die offenen Fragen sollen im Folgenden skizziert und – wenn möglich – Versuchsdesigns vorgeschlagen werden, mit denen sie in Folgeuntersuchungen evtl. beantwortet werden könnten.

Problematisch an der Teilstudie in Kapitel 1 ist die geringe Teststärke des trimodalen *race model*-Tests: In der Simulation wurde ein vergleichsweise hoher Koaktivierungseffekt angenommen, der beim bimodalen *race model*-Test (Abb. 1.1b–d, S. 29) einen entsprechend hohen Koaktivierungseffekt zur Folge hat. Der trimodale Koaktivierungseffekt ist dagegen sehr gering, zumindest wenn die „richtige“ Gleichung 1.5 verwendet wird (Abb. 1.2d, S. 30). Es ist also durchaus denkbar, dass die Stichprobe in Kapitel 1 (N=18) lediglich zu klein war, um den neuen *race model*-Test signifikant werden zu lassen.

Einem anderen Einwand kann leichter begegnet werden: Eriksen (1988) argumentiert, dass das Ergebnis des *race model*-Tests durch schnelle Spontanreaktionen (Antizipationen, *anti*) der Versuchspersonen verfälscht wird: Solche Reaktionen müssten sich in etwa gleich auf auditive, visuelle und bimodale Reize verteilen, entsprechend erhöhen sich die beobachteten Häufigkeiten schneller Reaktionen auf A, V und AV. In Realität sehe die *race model inequality* also wie folgt aus [$\text{anti} = p(RT_{\text{anti}} < t_0)$]:

$$p(RT_{AV} < t_0) + \text{anti} \leq p(RT_A < t_0) + \text{anti} + p(RT_V < t_0) + \text{anti} \quad (6.1)$$

Da $p(RT_{\text{anti}} < t_0)$, also der Anteil der Antizipationen schneller als t_0 , auf der linken Seite nur einmal, auf der rechten Seite jedoch zweimal hinzuaddiert wird, bleiben schwache Koaktivierungseffekte eventuell unentdeckt, da die linke Seite der Gleichung

hierdurch eine geringere Chance hat, größer zu sein als die rechte. Antizipationen wurden in der Teilstudie in Kapitel 1 wegen ihrer geringen Anzahl nicht systematisch ausgewertet. Es kann aber argumentiert werden, dass Antizipationen das Ergebnis von Gleichung 1.5 nicht in Richtung des *race model* verfälschen, sondern, wenn überhaupt, eher in Richtung des Koaktivierungsmodells: Der linke Term in Gleichung 1.5 hat vier Summanden, der rechte Term nur drei, entsprechend würde eher die linke Seite der Gleichung von Antizipationen profitieren, Antizipationen mithin eher zu einer Ablehnung des *race model* beitragen.

Die einzige Lösung, um die Frage nach trisensorischen Interaktionen endgültig zu beantworten, scheint daher in der Wahl einer deutlich größeren Stichprobe zu liegen. In einem solchen Experiment ließen sich auch, wie bereits erwähnt, die räumliche Beziehung der Teilstimuli² und ihr zeitlicher Versatz (vgl. Diederich & Colonius, in press) systematisch variieren.

In Kapitel 2 wurden Modalitätswechselkosten untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass ein Teil des Redundanzeffekts in den Reaktionszeiten auf den Umstand zurückgeführt werden kann, dass bimodale Reize von Modalitätswechseln nicht oder nur in geringem Maße betroffen sind. Wie sieht die Situation bei EKP-Analysen aus, z. B. vom Typ $AV - (A + V)$? Modalitätswechsel wirken sich auch auf evozierte Potentiale aus, z. B. ist die Amplitude der auditiven N1 geringer, wenn der Vorgängerreiz ebenfalls ein auditiver Reiz war (Rist & Cohen, 1987). Wechselte hingegen die Modalität, ist die Amplitude höher. Geht man wiederum davon aus, dass bimodale Reize nicht von Modalitätswechseln betroffen sind, dann sollte die Amplitude der unimodalen Komponenten im evozierten Potential zu AV ebenfalls geringer sein. Dies wiederum würde bedeuten, dass in $AV - (A + V)$ zwei EKPs mit zumindest z. T. erhöhter Amplitude (A , V) von einem EKP mit geringerer Amplitude abgezogen werden. Selbst wenn man vom Einwand der doppelt abgezogenen gemeinsamen Aktivität in $AV - (A + V)$ absieht, sollte sich das Ergebnis allein aufgrund der Modalitätswechsel von Null unterschei-

²in der Teilstudie in Kap. 1/3 wurde angestrebt, die Daten frei von trisensorischen Interaktionen zu halten, vgl. S. 63.

den. Die resultierende artifizielle multisensorische Interaktion erschiene in Form reduzierter unimodaler auditiver und visueller EKP-Komponenten. Die Lösung für dieses Problem wurde in Kapitel 2 bereits skizziert: nur Reize mit gleichem Vorgänger für die Auswertung verwenden. Hierdurch sinkt die Anzahl der verwendbaren Replikationen empfindlich, in Kapitel 3 z. B. auf ca. 1/9. Eine systematische Untersuchung des Einflusses von Modalitätswechseln auf die multisensorische Interaktion in $AV - (A + V)$ erfordert daher eine neu angelegte Untersuchung.

Neben Modalitätswechseln sind auch andere Reihenfolgeeffekte denkbar, die wiederum teilweise nur die unimodalen Reize betreffen, so z. B. Seitenwechsel bei lateralisierter Darbietung (bzw. das Gegenteil, *inhibition of return*, Quinlan & Hill, 1999), auch diese könnten in Folgeexperimenten unter die Lupe genommen werden.

In der EEG-Studie in Kapitel 3 wurde eine Methode vorgestellt, mit der Wechselwirkungen zwischen zwei Sinnessystemen (hier: Hören und Sehen, A und V) mit ereigniskorrelierten Potentialen (EKPs) untersucht werden können. Es wurde argumentiert (vgl. auch Teder-Sälejärvi et al., 2002), dass der einfache Vergleich des bimodal evozierten Potentials (AV) mit der Summe der unimodal evozierten Potentiale ($A + V$) problematisch ist, da gemeinsame Aktivität im Ausdruck $AV - (A + V)$ doppelt abgezogen wird. Trotz dieses Einwandes wurde diese Methode in einer Vielzahl von Untersuchungen verwendet (Barth et al., 1995; Besle et al., 2004; Calvert et al., 1999, 2000, 2001; Fort et al., 2002; Foxe et al., 2000, 2002; Giard & Peronnet, 1999; Gobbelé et al., 2002; Huttunen, Hari & Vanni, 1987; Klucharev et al., 2003; Lütkenhöner et al., 2002; Miniussi et al., 1998; Molholm et al., 2002; Murray et al., 2001, in press; Okajima et al., 1995; Raij et al., 2000; Sakowitz, Schürmann & Başar, 2000; Sakowitz, Quiroga, Schürmann & Başar, 2001; Schröger & Widmann, 1998; Schürmann et al., 2002; Supek et al., 1999; Teder-Sälejärvi et al., 2002, in press), in denen verschiedene Aspekte der multisensorischen Integration untersucht wurden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen stehen und fallen mit der Annahme, dass die gemeinsame Aktivität zumindest in gewissen Zeitbereichen (0...200 ms, Besle et al., 2004) vernachlässigbar ist oder durch „Holzhammer“-Methoden wie den von Teder-Sälejärvi et al. (2002) vor-

geschlagenen Hochpassfilter eliminiert werden kann. In jedem Fall blieben die Fragestellungen auf einfachste Integrationsprozesse beschränkt, denn „kompliziertere“ multisensorische Integrationsprozesse (z. B. bei der Wahrnehmung von natürlichen Objekten) spielen sich eher in späteren Zeitabschnitten nach Stimulusdarbietung ab.

Zur Lösung des Problems wurde in Kapitel 3 vorgeschlagen, einen taktilen Reiz (T) hinzuzunehmen und $(T + TAV) - (TA + TV)$ auszuwerten. Dieser EKP-Vergleich ist robust gegenüber gemeinsamer Aktivität, so dass sich eine Vielzahl an Möglichkeiten für weiterführende Untersuchungen ergibt, seien es Replikationsstudien der gerade genannten Untersuchungen, seien es Experimente zu multisensorischen Wechselwirkungen in späteren Verarbeitungsstufen. Das Problem der verschobenen Latenzen (vgl. S. 123) ließe sich evtl. umschiffen, indem man auf Zeitdruck und Redundanz-Paradigma verzichtet, so dass zumindest die Reaktionszeiten in den verschiedenen Bedingungen vergleichbar wären.

Aufgrund des EKP-Vergleichs in Kapitel 3 kann man schlussfolgern, dass sich die Verarbeitung eines bimodalen Stimulus irgendwie von der Verarbeitung der beiden unimodalen Teilstimuli unterscheidet und ich schloss mich der Vermutung von Giard und Peronnet (1999) an, dass es sich bei der beobachteten multisensorischen Interaktion um eine Modulation der visuellen N1 handeln könnte, beeinflusst durch den auditiven Reiz. Eine Möglichkeit, diese Frage genauer zu untersuchen, bestünde darin, die Reize mit unterschiedlichem Versatz zu präsentieren: Wie sieht die multisensorische Interaktion aus, wenn man den auditiven Reiz z. B. 50 ms nach dem visuellen Reiz präsentiert? Erscheint die multisensorische Interaktion weiterhin in Form einer Modulation der Aktivität in visuellen Arealen, oder kehrt sich die Richtung der Beeinflussung in diesem Falle um und wir beobachten eine Aktivitätsmodulation eher über auditiven Arealen? Eine systematische Variation der Stimulus-Onset-Asynchronie (vgl. z. B. Diederich & Colonius, in press) könnte hier Klarheit schaffen.

In Kapitel 4 wurde untersucht, ob die räumliche Beziehung der beiden Komponenten eines bimodalen Reizes einen Einfluss auf die multisensorische Wechselwirkung im EKP hat. Hierfür wurden die EKPs auf räumlich kongruente Reize mit den

EKPs auf räumlich inkongruente Reize verglichen. Diese methodische Neuerung kann in fMRI- und MEG-Untersuchungen wiederverwendet werden, es können aber auch neue Fragestellungen abgeleitet werden: Zum einen wäre es interessant zu überprüfen, ob sich der räumliche Kongruenzeffekt auch *intrahemisphärisch* zeigt: Lässt sich der räumliche Kongruenzeffekt auch dann beobachten, wenn man die Stimuli nicht links und rechts, sondern links oben und links unten präsentiert?

Eine andere Anwendung dieser Methode liegt im Bereich der multimodalen Objekterkennung: Beauchamp et al. (2004) untersuchten z. B. die neuronalen Grundlagen der Objektwahrnehmung mit fMRI, wobei Versuchspersonen die Aufgabe hatten, Objekte zu klassifizieren, die auditiv und visuell simultan im zentralen Gesichtsfeld dargeboten wurden. Hierbei passten Bild und Ton entweder zusammen (Hammer und Hammergeräusch) oder nicht (Säge und Hammergeräusch). Die bimodale Präsentation der Information löste für sich genommen bereits eine höhere Aktivierung im superioren temporalen Sulcus (STS) aus als die Summe der unimodalen Aktivierungen [Analyse vom Typ $AV - (A + V)$]. Passten Bild und Ton nicht zusammen, steigerte sich die Aktivität im STS noch zusätzlich (Analyse vom Typ kongruent–inkongruent). Aufbauend auf diesen und ähnlichen Befunden (Belardinelli et al., 2004; Molholm, Ritter, Javitt & Foxe, 2004) könnte man fragen, inwieweit Objekterkennung von der räumlichen Beziehung der Reize abhängig ist. Oder anders formuliert: Wie sieht der räumliche Kongruenzeffekt aus, wenn Bild und Ton zusammenpassen, und wie sieht er aus, wenn Bild und Ton nicht zusammenpassen?

In Kapitel 5 wurde gezeigt, dass der Redundanzgewinn stark durch räumliche Aufmerksamkeit beeinflusst werden kann: Musste die Versuchsperson nur einen Ort beachten, zeigte sich ein deutlicher Koaktivierungseffekt. Musste die Versuchsperson auf drei Orte achten, zeigten sich lediglich Reaktionszeitgewinne nach dem *race model*. In diesem Zusammenhang wäre eine Replikationsstudie von Interesse, in der zusätzlich ereigniskorrelierte Potentiale erhoben werden. Die Teilstudie in Kapitel 5 ist die einzige Studie der vorliegenden Arbeit, in der eine experimentelle Manipulation einen nennenswerten Einfluss auf den Koaktivierungseffekt hatte. In allen anderen Teilstu-

dien wurde in allen Bedingungen Koaktivierung beobachtet. Über die Frage, wo und wann im Gehirn denn nun die Koaktivierung stattfindet, konnten daher nur Vermutungen angestellt werden. Der Versuchsaufbau in Kapitel 5, in Kombination mit EEG-Messungen, könnte auf die Frage eventuell eine Antwort geben.

Literatur

- Allport, D. A. (1989). Visual attention. In M. I. Posner (Ed.), *Foundations of cognitive science* (Vol. 2, pp. 631–682). Cambridge: MIT Press.
- Anastacio, T. J., & Patton, P. E. (2004). Analysis and modeling of multisensory enhancement in the superior colliculus. In G. A. Calvert, C. Spence & B. E. Stein (Eds.), *The handbook of multisensory processes* (pp. 265–283). Cambridge: MIT Press.
- Andersen, R. A., Snyder, L. A., Bradley, D. C. & Xing, J. (1997). Multimodal representation of space in the posterior parietal cortex and its use in planning movements. *Annual Review of Neuroscience*, 20, 303–330.
- Arnott, S. R., Pratt, J., Shore, D. I. & Alain, C. (2001). Attentional set modulates visual areas. An event-related potential study of attentional capture. *Cognitive Brain Research*, 12(3), 383–395.
- Attneave, F. (1974). Apparent movement and the what-where connection. *Psychologia*, 17, 108–120.
- Avillac, M., Olivier, E., Denève, S., Ben Hamed, S. & Duhamel, J.-R. (2004). Multisensory integration in multiple reference frames in the posterior parietal cortex. *Cognitive Processing*, 5, 159–166.
- Barth, D. S., Goldberg, N., Brett, B. & Di, S. (1995). The spatiotemporal organization of auditory, visual, and auditory-visual evoked potentials in rat cortex. *Brain Research*, 678, 177–190.
- Beauchamp, M. S. (2004). Integration of auditory and visual information about objects in superior temporal sulcus. In *Talk, 5th International Multisensory Research*

Forum. Sitges (Spain).

- Beauchamp, M. S., Lee, K. E., Argall, B. D. & Martin, A. (2004). Integration of auditory and visual information about objects in superior temporal sulcus. *Neuron*, 41, 809–823.
- Belardinelli, M. O., Sestieri, C., Di Matteo, R., Delogu, F., Del Gratta, C., Feretti, A. et al. (2004). Audio-visual crossmodal interactions in environmental perception: an fMRI investigation. *Cognitive Processing*, 5, 167–174.
- Berman, A. L. (1961). Interaction of cortical responses to somatic and auditory stimuli in anterior ectosylvian gyrus of cat. *Journal of Neurophysiology*, 24, 608–620.
- Bernstein, I. H. (1970). Can we hear and see at the same time? In A. F. Sanders (Ed.), *Attention and Performance, III* (pp. 21–35). Amsterdam: North-Holland.
- Bernstein, I. H., Clark, M. H. & Edelstein, B. A. (1969). Effects of an auditory signal on visual reaction time. *Journal of Experimental Psychology*, 80(3), 567–569.
- Bernstein, I. H., & Edelstein, B. A. (1971). Effects of some variations in auditory input upon visual choice reaction time. *Journal of Experimental Psychology*, 87(2), 241–247.
- Besle, J., Fort, A. & Giard, M.-H. (2004). Interest and validity of the additive model in electrophysiological studies of multisensory interactions. *Cognitive Processing*, 5, 189–192.
- Bisley, J. W., Krishna, B. S. & Goldberg, M. E. (2004). A rapid and precise on response in posterior parietal cortex. *The Journal of Neuroscience*, 24(8), 1833–1838.
- Busch, C., Wilson, G., Orr, C. & Papanicolaou, A. C. (1989). Crossmodal interactions of auditory stimulus presentations on the visual evoked magnetic response. In S. J. Williamson (Ed.), *Advances in biomagnetism* (pp. 221–224). New York: Plenum Press.
- Busse, L., & Woldorff, M. G. (2003). The ERP omitted stimulus response to “no-stim” events and its implications for fast-rate event-related fMRI designs. *NeuroImage*, 18, 856–864.
- Calvert, G. A., Brammer, M. J., Bullmore, E. T., Campbell, R., Iversen, S. D. & Da-

- vis, A. S. (1999). Response amplification in sensory-specific cortices during crossmodal binding. *NeuroReport*, 10, 2619–2623.
- Calvert, G. A., Brammer, M. J. & Iversen, S. D. (1998). Crossmodal identification. *Trends in Cognitive Sciences*, 2(7), 247–253.
- Calvert, G. A., Campbell, R. & Brammer, M. J. (2000). Evidence from functional magnetic resonance imaging of crossmodal binding in the human heteromodal cortex. *Current Biology*, 10, 649–657.
- Calvert, G. A., Hansen, P. C., Iversen, S. D. & Brammer, M. J. (2001). Detection of audio-visual integration sites by application of electrophysiological criteria to the BOLD effect. *NeuroImage*, 14(2), 427–438.
- Calvert, G. A., Spence, C. & Stein, B. E. (2004). *The handbook of multisensory processes*. Cambridge: MIT Press.
- Cohen, A., & Shoup, R. (1997). Perceptual dimensional constraints on response selection processes. *Cognitive Psychology*, 32, 128–181.
- Cohen, R., & Rist, F. (1992). The modality shift effect. Further explorations at the crossroads. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 658, 163–181.
- Colby, C. L., & Goldberg, M. E. (1999). Space and attention in parietal cortex. *Annual Review of Neuroscience*, 22(1), 319–349.
- Coles, M. G. H., & Rugg, M. D. (1995). Event-related brain potentials: An introduction. In M. D. Rugg & M. G. H. Coles (Eds.), *Electrophysiology of mind – event-related brain potentials and cognition* (pp. 1–25). Oxford: Oxford University Press.
- Coles, M. G. H., Smid, H. G. O. M., Scheffers, M. K. & Otten, L. J. (1995). Mental chronometry and the study of human information processing. In M. D. Rugg & M. G. H. Coles (Eds.), *Electrophysiology of mind – event-related brain potentials and cognition* (pp. 86–130). Oxford: Oxford University Press.
- Corballis, M. C. (1998). Interhemispheric neural summation in the absence of the corpus callosum. *Brain*, 121, 1795–1807.
- Corballis, M. C. (2002). Hemispheric interactions in simple reaction time. *Neuropsychology*

- chologia*, 40, 423–434.
- Corballis, M. C., Hamm, J. P., Barnett, K. J. & Corballis, P. M. (2002). Paradoxical interhemispheric summation in the split brain. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14(8), 1151–1157.
- Deutsch, J. A., & Deutsch, D. (1963). Attention. Some theoretical considerations. *Psychological Review*, 70, 80–90.
- Diederich, A. (1992). Probability inequalities for testing separate activation models of divided attention. *Perception & Psychophysics*, 52(6), 714–716.
- Diederich, A., & Colonius, H. (1987). Intersensory facilitation in the motor component. A reaction time analysis. *Psychological Research*, 49, 23–29.
- Diederich, A., & Colonius, H. (1991). A further test of the superposition model for the redundant-signals effect in bimodal detection. *Perception & Psychophysics*, 50, 83–86.
- Diederich, A., & Colonius, H. (2004). Modeling the timecourse of multisensory interactions in manual and saccadic responses. In G. A. Calvert, C. Spence & B. E. Stein (Eds.), *The handbook of multisensory processes* (pp. 395–407). Cambridge: MIT Press.
- Diederich, A., & Colonius, H. (in press). Bimodal and trimodal multisensory enhancement: Effects of stimulus onset and intensity on reaction time. *Perception & Psychophysics*.
- Driver, J., & Spence, C. (1998). Attention and the crossmodal construction of space. *Trends in Cognitive Sciences*, 2, 254–262.
- Eason, R. G., Harter, W. & White, C. (1969). Effects of attention and arousal on visually evoked cortical potentials. *Physiology and Behavior*, 4, 283–289.
- Eimer, M. (1999). Can attention be directed to opposite locations in different modalities? An ERP study. *Clinical Neurophysiology*, 110, 1252–1259.
- Eriksen, B. A., & Eriksen, C. W. (1974). Effects of noise letters upon the identification of a target letter in a nonsearch task. *Perception & Psychophysics*, 16, 143–149.
- Eriksen, C. W. (1988). A source of error in attempts to distinguish coactivation from

- separate activation in the perception of redundant targets. *Perception & Psychophysics*, 44(2), 191–193.
- Eriksen, C. W., & Hoffman, J. E. (1972). Temporal and spatial characteristics of selective encoding from visual displays. *Perception & Psychophysics*, 12, 201–204.
- Feintuch, U., & Cohen, A. (2002). Visual attention and coactivation of response decisions for features from different dimensions. *Psychological Science*, 13(4), 361–369.
- Forster, B., Cavina-Pratesi, C., Aglioti, S. M. & Berlucchi, G. (2002). Redundant target effect and intersensory facilitation from visual-tactile interactions in simple reaction time. *Experimental Brain Research*, 143, 480–487.
- Fort, A., Delpuech, C., Pernier, J. & Giard, M.-H. (2002). Early auditory-visual interactions in human cortex during nonredundant target identification. *Cognitive Brain Research*, 20(1), 20–30.
- Fort, A., & Giard, M.-H. (2004). Multiple electrophysiological mechanisms of audio-visual integration in human perception. In G. A. Calvert, C. Spence & B. E. Stein (Eds.), *The handbook of multisensory processes* (pp. 503–514). Cambridge: MIT Press.
- Fournier, L. R., & Eriksen, C. W. (1990). Coactivation in the perception of redundant targets. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16(3), 538–550.
- Foxe, J. J., Morocz, I. A., Murray, M. M., Higgins, B. A., Javitt, D. C. & Schroeder, C. E. (2000). Multisensory auditory-somatosensory interactions in early cortical processing revealed by high-density electrical mapping. *Cognitive Brain Research*, 10, 77–83.
- Foxe, J. J., & Simpson, G. V. (2002). Flow of activation from V1 to frontal cortex in humans: A framework for defining “early” visual processing. *Experimental Brain Research*, 142, 139–150.
- Foxe, J. J., Wylie, G. R., Martinez, A., Schroeder, C. E., Javitt, D. C., Guilfoyle, D. et

- al. (2002). Auditory-somatosensory processing in auditory association cortex: An fMRI study. *Journal of Neurophysiology*, 88, 540–543.
- Frassinetti, F., Bolognini, N. & Làdavas, E. (2002). Enhancement of visual perception and by crossmodal visuo-auditory interaction. *Experimental Brain Research*, 147(1), 332–343.
- Frassinetti, F., Pavani, F. & Làdavas, E. (2002). Acoustical vision of neglected stimuli: Interaction among spatially converging audiovisual inputs in neglect patients. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14(1), 62–69.
- Ghaffari, N., & Gondan, M. (unveröff.). Die Rolle der visuell-räumlichen Aufmerksamkeit beim Redundanzeffekt. *Semesterarbeit*.
- Giard, M.-H., & Peronnet, F. (1999). Auditory-visual integration during multimodal object recognition in humans: A behavioral and electrophysiological study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 11, 473–490.
- Giray, M., & Ulrich, R. (1993). Motor coactivation revealed by response force in divided and focused attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 19(6), 1278–1291.
- Gobbelé, R., Schürmann, M., Forss, N., Juottonen, K., Buchner, H. & Hari, R. (2002). Activation of the human posterior parietal and temporoparietal cortices during audiotactile interaction. *NeuroImage*, 20(1), 503–511.
- Gondan, M., Lange, K., Rösler, F. & Röder, B. (2004). The redundant target effect is affected by modality switch costs. *Psychonomic Bulletin & Review*, 11(2), 307–313.
- Gondan, M., Niederhaus, B., Rösler, F. & Röder, B. (in press). Multisensory processing in the redundant target effect: A behavioral and event-related potential study. *Perception & Psychophysics*.
- Gondan, M., & Röder, B. (2004a). Detecting multisensory interactions in event-related potentials. In *Graduate Student Symposium, 5th International Multisensory Research Forum*. Sitges (Spain).
- Gondan, M., & Röder, B. (2004b). Multisensorische Integration von redundanten

- Reizen erfordert räumliche Aufmerksamkeit. In *Symposium, TeaP 2004*. Gießen (Germany).
- Gondan, M., & Röder, B. (submitted). Testing trisensory interactions. *Perception & Psychophysics*.
- Graziano, M. S. A., & Gross, C. S. (1995). The representation of extrapersonal space: A possible role for bimodal, visual-tactile neurons. In M. S. Gazzaniga (Ed.), *The cognitive neurosciences* (pp. 1021–1034). Cambridge: MIT Press.
- Harrington, L. K., & Peck, C. K. (1998). Spatial disparity affects visual-auditory interactions in human sensorimotor processing. *Experimental Brain Research*, 122, 247–252.
- Hershenson, M. (1962). Reaction time as a measure of intersensory facilitation. *Journal of Experimental Psychology*, 63(3), 289–293.
- Hillyard, S. A., Hink, R. F., Schwent, V. L. & Picton, T. W. (1973). Electrical signs of selective attention in the human brain. *Science*, 182, 177–180.
- Hillyard, S. A., & Picton, T. W. (1987). Event-related potentials and selective information processing in man. In J. R. Johnson, J. W. Rohrbaugh & R. Parasuraman (Eds.), *Current trends in event-related potential research. Electroencephalography and Clinical Neurophysiology Suppl.* 40 (pp. 61–67). Amsterdam: Elsevier.
- Hillyard, S. A., Simpson, G. V., Woods, D. L., van Voorhis, S. & Münte, T. F. (1984). Event-related brain potentials and selective attention to different modalities. In F. Reinoso-Suarez (Ed.), *Cortical Integration* (pp. 395–414). New York: Raven Press.
- Howard, I. P., & Templeton, W. B. (1966). *Human spatial orientation*. London: Wiley.
- Hughes, H. C., Reuter-Lorenz, P. A., Nozawa, G. & Fendrich, R. (1994). Visual-auditory interactions in sensorimotor processing: Saccades versus manual responses. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 20(1), 131–153.
- Huttunen, J., Hari, R. & Vanni, S. (1987). Crossmodal interaction is reflected in vertex potentials but not in magnetic fields. *Acta Neurologica Scandinavica*, 75, 410–

- Iacobini, M., Ptito, A., Weekes, N. Y. & Zaidel, E. (2000). Parallel visuomotor processing in the split brain: Cortico-subcortical interactions. *Brain*, 123, 759–769.
- Jiang, W., Jiang, H. & Stein, B. E. (2002). Two corticotectal areas facilitate multisensory orientation behavior. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14(8), 1240–1255.
- Jiang, W., Wallace, M. T., Jiang, H., Vaughan, J. W. & Stein, B. E. (2001). Two cortical areas mediate multisensory integration in superior colliculus neurons. *Journal of Neurophysiology*, 85, 506–522.
- Kadunce, D. C., Vaughan, J. W., Wallace, M. T. & Stein, B. E. (2001). The influence of visual and auditory receptive field organization on multisensory integration in the superior colliculus. *Experimental Brain Research*, 139, 303–310.
- Klein, R. M. (1977). Attention and visual dominance: A chronometric analysis. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 3(3), 365–378.
- Klucharev, V., Möttönen, R. & Sams, M. (2003). Electrophysiological indicators of phonetic and non-phonetic multisensory interactions during audiovisual speech perception. *Cognitive Brain Research*, 18, 65–75.
- Lewis, J. W., Beauchamp, M. S. & DeYoe, E. A. (2000). A comparison of visual and auditory motion processing in human cerebral cortex. *Cerebral Cortex*, 10, 873–888.
- Lovelace, C. T., Stein, B. E. & Wallace, M. T. (2003). An irrelevant light enhances auditory detection in humans: A psychophysical analysis of multisensory integration in stimulus detection. *Cognitive Brain Research*, 17, 447–453.
- Loveless, N. E., Brebner, J. & Hamilton, P. (1970). Bisensory presentation of information. *Psychological Bulletin*, 73(3), 161–195.
- Luck, S. J., Heinze, H. J., Mangun, G. R. & Hillyard, S. A. (1990). Visual event-related potentials index focused attention within bilateral stimulus array. II. Functional dissociation within bilateral stimulus array. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 75, 528–542.

- Lütkenhöner, B., Lammertmann, C., Simões, C. & Hari, R. (2002). Magnetoencephalographic correlates of audiotactile interaction. *NeuroImage*, 15, 509–522.
- Macaluso, E., & Driver, J. (2001). Spatial attention and crossmodal interactions between vision and touch. *Neuropsychologia*, 39(12), 1304–1316.
- Macaluso, E., Frith, C. D. & Driver, J. (2002). Supramodal effects of covert spatial orienting triggered by visual or tactile events. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14(3), 389–401.
- Mangun, G. R. (1995). Neural mechanisms of visual selective attention. *Psychophysiology*, 32, 4–18.
- Marks, L. E. (2004). Cross-modal interactions in speeded classification. In G. A. Calvert, C. Spence & B. E. Stein (Eds.), *The handbook of multisensory processes* (pp. 85–105). Cambridge: MIT Press.
- Mazzoni, P., Bracewell, R. M., Barash, S. & Andersen, R. A. (1996). Spatially tuned auditory responses in area lip of macaques performing delayed memory saccades to acoustic targets. *Journal of Neurophysiology*, 75(3), 1233–1242.
- McDonald, J. J., Teder-Sälejärvi, W. A. & Hillyard, S. A. (2000). Involuntary orienting to sound improves visual perception. *Nature*, 407, 906–908.
- Melara, R. D., & O'Brien, T. P. (1987). Interaction between synesthetically corresponding dimensions. *Journal of Experimental Psychology: General*, 116, 323–336.
- Meredith, M. A., Nemitz, J. W. & Stein, B. E. (1987). Determinants of multisensory integration in superior colliculus neurons. I. Temporal factors. *The Journal of Neuroscience*, 7(10), 3215–3229.
- Meredith, M. A., & Stein, B. E. (1987). Spatial factors determine the activity of multisensory neurons in the cat's superior colliculus. *Brain Research*, 420, 162–166.
- Miller, J. (1982). Divided attention: evidence for coactivation with redundant signals. *Cognitive Psychology*, 14, 247–279.
- Miller, J. (1986). Timecourse of coactivation in bimodal divided attention. *Perception & Psychophysics*, 40, 331–343.
- Miller, J. (1991). Channel interaction and the redundant-target effect in bimodal di-

- vided attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 17(1), 160–169.
- Miller, J., Ulrich, R. & Lamarre, Y. (2001). Locus of the redundant-signals effect in bimodal divided attention: A neurophysiological analysis. *Perception & Psychophysics*, 63(3), 555–562.
- Miniussi, C., Girelli, M. & Marzi, C. A. (1998). Neural site of the redundant target effect: Electrophysiological evidence. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 10(2), 216–230.
- Molholm, S., Ritter, W., Javitt, D. C. & Foxe, J. J. (2004). Multisensory visual-auditory object recognition in humans: a high-density electrical mapping study. *Cerebral Cortex*, 14, 452–465.
- Molholm, S., Ritter, W., Murray, M. M., Javitt, D. C., Schroeder, C. E. & Foxe, J. J. (2002). Multisensory auditory-visual interactions during early sensory processing in humans: A high-density electrical mapping study. *Cognitive Brain Research*, 14, 115–128.
- Mordkoff, J. T. (1992). Testing models of the redundant-signals effect: A warning concerning the combination-rule regression analysis. *Perception & Psychophysics*, 52(5), 589–594.
- Mordkoff, J. T., Miller, J. & Roch, A.-C. (1996). Absence of coactivation in the motor component: Evidence from psychophysiological measures of target detection. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 22(1), 25–41.
- Mordkoff, J. T., & Yantis, S. (1991). An interactive race model of divided attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 17(2), 520–538.
- Murray, M. M., Foxe, J. J., Higgins, B. A., Javitt, D. C. & Schroeder, C. E. (2001). Visuo-spatial neural response interactions in early cortical processing during a simple reaction time task: a high-density electrical mapping study. *Neuropsychologia*, 39, 828–844.

- Murray, M. M., Molholm, S., Michel, C. M., Ritter, W., Heslenfeld, D. J., Schroeder, C. E. et al. (in press). Grabbing your ear: Auditory-tactile multisensory interactions in humans are not constrained by stimulus alignment. *Cerebral Cortex*.
- Näätänen, R., Gaillard, A. W. K. & Mantysalo, S. (1978). Early selective attention effect on evoked potential reinterpreted. *Acta Psychologica*, 42, 313–329.
- Nickerson, R. S. (1973). Intersensory facilitation of reaction time: Energy summation or preparation enhancement? *Psychological Review*, 80(6), 489–509.
- Okajima, Y., Chino, N., Takahashi, M. & Kimura, A. (1995). Effects of visual and auditory stimuli on median nerve somatosensory evoked potentials in man. *Electromyography and Clinical Neurophysiology*, 35, 251–256.
- Pascual-Marqui, R. D., Michel, C. M. & Lehmann, D. (1995). Segmentation of brain electrical activity into microstates. Model estimation and validation. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 42, 658–665.
- Plat, F. M., Praamstra, P. & Horstink, M. W. I. M. (2000). Redundant-signals effects on reaction time, response force, and movement-related potentials in Parkinson's disease. *Experimental Brain Research*, 130, 533–539.
- Poffenberger, A. T. (1912). Reaction time to retinal stimulation with special reference to the time lost in conduction through nerve centers. *Archives of Psychology*, 23, 1–73.
- Posner, M. I., Nissen, M. J. & Ogden, W. C. (1978). Attended and unattended processing modes: the role for spatial location. In N. H. L. Pick & I. J. Saltzman (Eds.), *Modes of perceiving and processing information* (pp. 137–157). Hillsdale: Erlbaum.
- Quinlan, P. T., & Hill, N. I. (1999). Sequential effects in rudimentary auditory and visual tasks. *Perception & Psychophysics*, 61(2), 375–385.
- Raab, D. H. (1962). Statistical facilitation of simple reaction times. *Transactions of the New York Academy of Sciences*, 24, 574–590.
- Raij, T., Uutela, K. & Hari, R. (2000). Audiovisual integration of letters in the human brain. *Neuron*, 28, 617–625.

- Reuter-Lorenz, P. A., Nozawa, G., Gazzaniga, M. S. & Hughes, H. C. (1995). Fate of neglected targets: A chronometric analysis of redundant target effects in the bisected brain. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21(2), 211–230.
- Rist, F., & Cohen, R. (1987). Effects of modality shift on event-related potentials and reaction times of chronic schizophrenics. In J. R. Johnson, J. W. Rohrbaugh & R. Parasuraman (Eds.), *Current trends in event-related potential research. Electroencephalography and Clinical Neurophysiology Suppl.* 40 (pp. 738–745). Amsterdam: Elsevier.
- Rolls, E. T. (2004). Multisensory neuronal convergence of taste, somatosensory, visual, olfactory, and auditory inputs. In G. A. Calvert, C. Spence & B. E. Stein (Eds.), *The handbook of multisensory processes* (pp. 311–331). Cambridge: MIT Press.
- Roser, M., & Corballis, M. C. (2002). Interhemispheric neural summation in the split brain with symmetrical and asymmetrical displays. *Neuropsychologia*, 40, 1300–1312.
- Sakowitz, O. W., Quiroga, R. W., Schürmann, M. & Başar, E. (2001). Bisensory stimulation increases gamma-responses over multiple cortical regions. *Cognitive Brain Research*, 11, 267–279.
- Sakowitz, O. W., Schürmann, M. & Başar, E. (2000). Oscillatory frontal theta responses are increased upon bisensory stimulation. *Clinical Neurophysiology*, 111(5), 884–893.
- Schmidt, R. A., Gielen, S. C. A. M. & van den Heuvel, P. J. M. (1984). The locus of intersensory facilitation of reaction time. *Acta Psychologica*, 57, 145–164.
- Schroeder, C. E., & Foxe, J. J. (2002). The timing and laminar profile of converging inputs to multisensory areas of the macaque neocortex. *Cognitive Brain Research*, 14, 187–198.
- Schroeder, C. E., & Foxe, J. J. (2004). Multisensory convergence in early cortical processing. In G. A. Calvert, C. Spence & B. E. Stein (Eds.), *The handbook of multisensory processes* (pp. 295–309). Cambridge: MIT Press.

- Schröger, E., & Widmann, A. (1998). Speeded responses to audiovisual changes result from bimodal integration. *Psychophysiology*, 35, 755–759.
- Schürmann, M., Kolev, V., Menzel, K. & Yordanova, J. (2002). Spatial coincidence modulates interaction between visual and somatosensory evoked potentials. *NeuroReport*, 13(6), 779–783.
- Schwarz, W. (1989). A new model to explain the redundant-signals effect. *Perception & Psychophysics*, 46, 498–500.
- Shams, L., Kamitani, Y. & Shimojo, S. (2000). What you see is what you hear. *Nature*, 408, 788.
- Simon, J. R., & Craft, J. L. (1970). Effects of an irrelevant auditory stimulus on visual choice reaction time. *Journal of Experimental Psychology*, 86(2), 272–274.
- Simson, R., Vaughan, H. G. & Ritter, W. (1976). The scalp topography of potentials associated with missing visual or auditory stimuli. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 40, 33–42.
- Soto-Faraco, S., Lyons, J., Gazzaniga, M. S., Spence, C. & Kingstone, A. (2002). The ventriloquist in motion: Illusory capture of of dynamic information across sensory modalities. *Cognitive Brain Research*, 14, 139–146.
- Spence, C., Nicholls, M. E. R. & Driver, J. (2001). The cost of expecting events in the wrong sensory modality. *Perception & Psychophysics*, 63(2), 330–336.
- Stein, B. E. (1998). Neural mechanisms for synthesizing sensory information and producing adaptive behaviors. *Experimental Brain Research*, 123, 124–135.
- Stein, B. E., Jiang, W. & Stanford, T. R. (2004). Multisensory integration in single neurons of the midbrain. In G. A. Calvert, C. Spence & B. E. Stein (Eds.), *The handbook of multisensory processes* (pp. 243–263). Cambridge: MIT Press.
- Stein, B. E., & Meredith, M. A. (1993). *The merging of the senses*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Sternberg, S. (1969). The discovery of processing stages: Extensions of Donders' method. In W. G. Koster (Ed.), *Attention and Performance II* (pp. 276–315). Amsterdam: North-Holland.

- Sumby, W. H., & Pollack, I. (1954). Visual contribution to speech intelligibility in noise. *Journal of the Acoustic Society of America*, 26, 212–215.
- Supek, S., Aine, C. J., Ranken, D., Best, E., Flynn, E. R. & Wood, C. C. (1999). Single vs. paired visual stimulation: Superposition of early neuromagnetic responses and retinotopy in extrastriate cortex in humans. *Brain Research*, 830, 43–55.
- Tassinari, G., Campara, D., Benedetti, C. & Berlucchi, G. (2002). The contribution of general and specific motor inhibitory sets to the so-called auditory inhibition of return. *Experimental Brain Research*, 146, 523–530.
- Teder-Sälejärvi, W. A., Hillyard, S. A., Röder, B. & Neville, H. J. (1999). Spatial attention to central and peripheral auditory stimuli as indexed by event-related potentials. *Cognitive Brain Research*, 8(3), 213–227.
- Teder-Sälejärvi, W. A., McDonald, J. J., Russo, F. D. & Hillyard, S. A. (2002). An analysis of audio-visual crossmodal integration by means of event-related potential (erp) recordings. *Cognitive Brain Research*, 14, 106–114.
- Teder-Sälejärvi, W. A., Russo, F. D., McDonald, J. J. & Hillyard, S. A. (in press). Audio-visual multimodal integration is affected by spatial congruity. *Journal of Cognitive Neuroscience*.
- Townsend, J. T., & Ashby, F. G. (1983). *The stochastic modeling of elementary psychological processes*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Treisman, A. M. (1969). Strategies and models of selective attention. *Psychological Review*, 76, 282–299.
- Treisman, A. M. (1986). Properties, parts, and objects. In K. R. Boff, L. Kaufman & J. P. Thomas (Eds.), *Handbook of human perception and performance* (pp. 35/1–35/70). New York: Wiley.
- Treisman, A. M., & Gelade, G. (1980). A feature integration theory of attention. *Cognitive Psychology*, 12, 97–136.
- Wallace, M. T., Meredith, M. A. & Stein, B. E. (1992). Integration of multiple sensory modalities in cat cortex. *Experimental Brain Research*, 91, 484–488.
- Wallace, M. T., & Stein, B. E. (1994). Cross-modal synthesis in the midbrain depends

- on input from cortex. *Journal of Neurophysiology*, 71(1), 429–432.
- Wallace, M. T., & Stein, B. E. (2000). Onset of cross-modal synthesis in the neonatal superior colliculus is gated by the development of cortical influences. *Journal of Neurophysiology*, 83(6), 3578–3582.
- Wallace, M. T., & Stein, B. E. (2001). Sensory and multisensory responses in the newborn monkey superior colliculus. *The Journal of Neuroscience*, 21(22), 8886–8894.
- Walter, W. G., Cooper, R., Aldridge, V. J., McCallum, W. C. & Winter, A. L. (1964). The contingent negative variation. *Nature*, 203, 380–384.
- Welch, R. B., & Warren, D. H. (1986). Intersensory interactions. In K. R. Boff, L. Kaufman & J. P. Thomas (Eds.), *Handbook of perception and human performance* (pp. 25/1–25/36). New York: Wiley.

Autorenverzeichnis

- Aglioti, S. M., 10, 147
Aine, C. J., 156
Alain, C., 94, 143
Aldridge, V. J., 51, 157
Allport, D. A., 143
Anastacio, T. J., 18, 143
Andersen, R. A., 18, 94, 143, 151
Argall, B. D., 18, 144
Arnott, S. R., 94, 143
Ashby, F. G., 14, 26, 156
Attneave, F., 12, 143
Avillac, M., 18, 143

Barash, S., 94, 151
Barnett, K. J., 11, 146
Barth, D. S., 11, 138, 143
Başar, E., 138, 154
Beauchamp, M. S., 18, 69, 71, 143, 144, 150
Belardinelli, M. O., 72, 140, 144
Ben Hamed, S., 18, 143
Benedetti, C., 36, 156
Berlucchi, G., 10, 36, 147, 156
Berman, A. L., 144
Bernstein, I. H., 5, 15, 77, 82, 101, 107, 113,
119, 128, 144
Besle, J., 51, 122, 138, 144
Best, E., 156
Bisley, J. W., 18, 144
Bolognini, N., 148
Bracewell, R. M., 94, 151
Bradley, D. C., 18, 143
Brammer, M. J., 4, 50, 144, 145
Brebner, J., 4, 150
Brett, B., 11, 143
Buchner, H., 148
Bullmore, E. T., 144
Busch, C., 134, 144
Busse, L., 53, 56, 144

Calvert, G. A., 3, 4, 50, 52, 65, 138, 144,
145
Campara, D., 36, 156
Campbell, R., 50, 144, 145
Cavina-Pratesi, C., 10, 147
Chino, N., 50, 153
Clark, M. H., 5, 144
Cohen, A., 77, 92, 99–101, 112, 130, 145,
147

- Cohen, R., 36, 44, 120, 121, 128, 137, 145,
154
- Colby, C. L., 18, 145
- Coles, M. G. H., 12, 49, 145
- Colonius, H., 11, 13, 15, 22, 24, 26, 33, 37,
68, 100, 107, 108, 113, 119, 137,
139, 146
- Cooper, R., 51, 157
- Corballis, M. C., 8, 10, 11, 100, 132, 145,
146, 154
- Corballis, P. M., 11, 146
- Craft, J. L., 5, 15, 155
- Davis, A. S., 145
- Del Gratta, C., 144
- Delogu, F., 144
- Delpuech, C., 50, 147
- Denève, S., 18, 143
- Deutsch, D., 97, 146
- Deutsch, J. A., 97, 146
- DeYoe, E. A., 150
- Di Matteo, R., 144
- Di, S., 11, 143
- Diederich, A., 11, 13, 15, 22, 24, 26, 33, 37,
67, 100, 107, 108, 113, 119, 137,
139, 146
- Driver, J., 4, 18, 35, 146, 151, 155
- Duhamel, J.-R., 18, 143
- Eason, R. G., 98, 146
- Edelstein, B. A., 5, 15, 113, 128, 144
- Eimer, M., 4, 114, 146
- Eriksen, B. A., 99, 146
- Eriksen, C. W., 92, 99, 101, 146, 147
- Feintuch, U., 77, 92, 100, 101, 112, 130, 147
- Fendrich, R., 149
- Feretti, A., 144
- Flynn, E. R., 156
- Forss, N., 148
- Forster, B., 10, 68, 147
- Fort, A., 50–52, 63, 122, 138, 144, 147
- Fournier, L. R., 92, 101, 147
- Foxe, J. J., 10, 50, 52, 65, 121, 134, 135,
138, 140, 147, 152, 154
- Frassinetti, F., 148
- Frith, C. D., 18, 151
- Gaillard, A. W. K., 98, 153
- Gazzaniga, M. S., 11, 114, 154, 155
- Gelade, G., 98, 156
- Ghaffari, N., 114, 148
- Giard, M.-H., 50–52, 67, 122, 134, 135,
138, 144, 147, 148
- Gielen, S. C. A. M., 154
- Giray, M., 68, 100, 148
- Girelli, M., 10, 152
- Gobbelé, R., 50, 52, 138, 148
- Goldberg, M. E., 18, 144, 145
- Goldberg, N., 11, 143
- Gondan, M., 19, 20, 114, 118, 120, 121,
124, 126, 148, 149
- Graziano, M. S. A., 94, 149
- Gross, C. S., 94, 149

- Guilfoyle, D., 147
- Hamilton, P., 4, 150
- Hamm, J. P., 11, 146
- Hansen, P. C., 50, 145
- Hari, R., 50, 138, 148, 149, 151, 153
- Harrington, L. K., 149
- Harter, W., 98, 146
- Heinze, H. J., 134, 150
- Hershenson, M., 13, 37, 68, 149
- Heslenfeld, D. J., 153
- Higgins, B. A., 10, 147, 152
- Hill, N. I., 36, 92, 138, 153
- Hillyard, S. A., 4, 12, 68, 98, 114, 134, 149–151, 156
- Hink, R. F., 98, 149
- Hoffman, J. E., 99, 147
- Horstink, M. W. I. M., 14, 153
- Howard, I. P., 4, 149
- Hughes, H. C., 11, 149, 154
- Huttunen, J., 138, 149
- Iacobini, M., 51, 150
- Iversen, S. D., 4, 50, 144, 145
- Javitt, D. C., 10, 140, 147, 152
- Jiang, H., 18, 150
- Jiang, W., 18, 19, 150, 155
- Juottonen, K., 148
- Kadunce, D. C., 17, 150
- Kamitani, Y., 4, 155
- Kimura, A., 50, 153
- Kingstone, A., 114, 155
- Klein, R. M., 7, 150
- Klucharev, V., 72, 138, 150
- Kolev, V., 50, 155
- Krishna, B. S., 18, 144
- Làdavas, E., 148
- Lamarre, Y., 14, 152
- Lammertmann, C., 50, 151
- Lange, K., 19, 148
- Lee, K. E., 18, 144
- Lehmann, D., 123, 153
- Lewis, J. W., 150
- Lovelace, C. T., 4, 150
- Loveless, N. E., 4, 150
- Luck, S. J., 134, 150
- Lütkenhöner, B., 50, 52, 65, 138, 151
- Lyons, J., 114, 155
- Macaluso, E., 18, 151
- Mangun, G. R., 134, 150, 151
- Mantysalo, S., 98, 153
- Marks, L. E., 151
- Martin, A., 18, 144
- Martinez, A., 147
- Marzi, C. A., 10, 152
- Mazzoni, P., 94, 151
- McCallum, W. C., 51, 157
- McDonald, J. J., 4, 12, 68, 69, 151, 156
- Melara, R. D., 113, 151
- Menzel, K., 50, 155

Autorenverzeichnis

- Meredith, M. A., 17, 18, 34, 67, 69, 90, 119, 124, 151, 155, 156
- Michel, C. M., 123, 153
- Miller, J., 3, 7, 9–11, 13, 14, 21, 22, 35, 37, 55, 68, 100, 107, 109, 113, 117, 128, 151, 152
- Miniussi, C., 10, 50, 100, 138, 152
- Molholm, S., 11, 22, 50, 63, 67, 100, 121, 138, 140, 152, 153
- Mordkoff, J. T., 10, 14, 26, 152
- Morocz, I. A., 147
- Möttönen, R., 72, 150
- Münste, T. F., 4, 149
- Murray, M. M., 10–12, 22, 50, 68, 100, 121, 138, 147, 152, 153
- Näätänen, R., 98, 129, 153
- Nemitz, J. W., 18, 151
- Neville, H. J., 114, 156
- Nicholls, M. E. R., 35, 155
- Nickerson, R. S., 82, 93, 127, 129, 130, 153
- Niederhaus, B., 20, 148
- Nissen, M. J., 92, 153
- Nozawa, G., 11, 149, 154
- O'Brien, T. P., 113, 151
- Ogden, W. C., 92, 153
- Okajima, Y., 50, 138, 153
- Olivier, E., 18, 143
- Orr, C., 134, 144
- Otten, L. J., 12, 145
- Papanicolaou, A. C., 134, 144
- Pascual-Marqui, R. D., 123, 153
- Patton, P. E., 18, 143
- Pavani, F., 148
- Peck, C. K., 149
- Pernier, J., 50, 147
- Peronnet, F., 50, 52, 67, 122, 134, 135, 138, 148
- Picton, T. W., 98, 149
- Plat, F. M., 14, 100, 153
- Poffenberger, A. T., 92, 153
- Pollack, I., 4, 5, 156
- Posner, M. I., 92, 97, 153
- Praamstra, P., 14, 153
- Pratt, J., 94, 143
- Ptito, A., 51, 150
- Quinlan, P. T., 36, 92, 138, 153
- Quiroga, R. W., 138, 154
- Raab, D. H., 6, 7, 21, 127, 153
- Raij, T., 50, 52, 138, 153
- Ranken, D., 156
- Reuter-Lorenz, P. A., 11, 132, 149, 154
- Rist, F., 36, 44, 120, 121, 128, 137, 145, 154
- Ritter, W., 53, 140, 152, 153, 155
- Roch, A.-C., 10, 152
- Röder, B., 19, 20, 114, 118, 121, 126, 148, 149, 156
- Rolls, E. T., 18, 154
- Roser, M., 11, 132, 154
- Rösler, F., 19, 20, 148

- Rugg, M. D., 49, 145
- Russo, F. D., 12, 68, 156
- Sakowitz, O. W., 138, 154
- Sams, M., 72, 150
- Scheffers, M. K., 12, 145
- Schmidt, R. A., 91, 128, 154
- Schroeder, C. E., 10, 135, 147, 152–154
- Schröger, E., 11, 50, 67, 138, 155
- Schürmann, M., 50, 52, 138, 148, 154, 155
- Schwarz, W., 14, 25, 26, 129, 155
- Schwent, V. L., 98, 149
- Sestieri, C., 144
- Shams, L., 4, 5, 155
- Shimojo, S., 4, 155
- Shore, D. I., 94, 143
- Shoup, R., 77, 99, 112, 130, 145
- Simões, C., 50, 151
- Simon, J. R., 5, 15, 155
- Simpson, G. V., 4, 134, 147, 149
- Simson, R., 53, 56, 155
- Smid, H. G. O. M., 12, 145
- Snyder, L. A., 18, 143
- Soto-Faraco, S., 114, 155
- Spence, C., 3, 4, 35, 114, 120, 128, 145, 146, 155
- Stanford, T. R., 155
- Stein, B. E., 3, 4, 17–19, 34, 67–69, 90, 119, 124, 145, 150, 151, 155–157
- Sternberg, S., 69, 93, 155
- Sumby, W. H., 4, 5, 156
- Supek, S., 50, 138, 156
- Takahashi, M., 50, 153
- Tassinari, G., 36, 92, 156
- Teder-Sälejärvi, W. A., 4, 12, 51, 67, 68, 80, 114, 122, 134, 135, 138, 151, 156
- Templeton, W. B., 4, 149
- Townsend, J. T., 14, 26, 156
- Treisman, A. M., 98, 113, 156
- Ulrich, R., 14, 68, 100, 148, 152
- Uutela, K., 50, 153
- van den Heuvel, P. J. M., 154
- van Voorhis, S., 4, 149
- Vanni, S., 138, 149
- Vaughan, H. G., 53, 155
- Vaughan, J. W., 17, 18, 150
- Wallace, M. T., 4, 17–19, 34, 63, 90, 150, 156, 157
- Walter, W. G., 51, 157
- Warren, D. H., 4, 157
- Weekes, N. Y., 51, 150
- Welch, R. B., 4, 157
- White, C., 98, 146
- Widmann, A., 11, 50, 67, 138, 155
- Wilson, G., 134, 144
- Winter, A. L., 51, 157
- Woldorff, M. G., 53, 56, 144
- Wood, C. C., 156
- Woods, D. L., 4, 149
- Wylie, G. R., 147

Autorenverzeichnis

Xing, J., 18, 143

Yordanova, J., 50, 155

Yantis, S., 10, 152

Zaidel, E., 51, 150

Sachverzeichnis

- auditiver Reiz, 3
- Aufmerksamkeit, 97, 98
- AV – (A + V), 50–52
- bimodaler Reiz, 3
- bisensorische Interaktionen, 118
- coactivation model, 9, 22
- Colliculus superior, 17, 67
 - inverse effectiveness, 18
 - response depression, 17, 67
 - response enhancement, 17, 67
 - spatial rule, 17
 - temporal rule, 17
- dimensional action model, 99, 100
- energy summation, 15, 123, 126, 128, 130
- ereigniskorrelierte Potentiale, 49, 67
- feature integration, 98
- flanker task, 99
- intersensorische Erleichterung, 5, 15
- inverse effectiveness, 18
- Koaktivierung, 22
- Antwortselektion, 11
- auditiv-taktil, 39
- auditiv-visuell, 39
- bimodale Reize, 11
- dimensional action model, 100
- Modalitätswechsel, 37
- Motorik, 11, 13
- perzeptuelle Ebene, 11
- Reaktionskonflikt, 10
- räumliche Aufmerksamkeit, 101, 105,
 - 111, 112
 - visuell, 114, 115
- räumliche Beziehung, 83, 84
- räumlicher Kongruenzeffekt, 83
- Simulation, 25, 29, 30
- Split-Brain-Patienten, 10
- Superpositionsmodell, 14
- trisensorisch, 33
- unimodale Reize, 10
- visuell-taktil, 39
- Koaktivierungsmodell, 9
- Modalitätswechsel, 35, 36, 105, 111
 - Simulation, 38

- Modalitätswechselkosten, 120, 128
- multisensorische Integration, 3, 4
 - Antwortrelevanz, 90
 - Colliculus superior, 17
 - energy summation, 128, 130
 - Illusionen, 5
 - Kontexteffekte, 5
 - Kortex, 18
 - kortikale Mechanismen, 133
 - Modalitätswechselkosten, 128
 - Modell, 131
 - preparation enhancement, 91–93, 128
 - räumliche Aufmerksamkeit, 97, 98, 112
 - visuell, 114, 115
 - räumliche Beziehung, 12
 - räumlicher Kongruenzeffekt, 73, 75, 85, 87, 89, 90, 92, 94
 - spezifisch, 5
 - statistical facilitation, 127
 - unspezifisch, 4
 - zeitliche Beziehung, 13
 - zelluläre Mechanismen, 17
- multisensorische Interaktion
 - bisensorisch, 118
 - energy summation, 123, 126
 - Modalitätswechselkosten, 120
 - preparation enhancement, 123, 125
 - räumliche Aufmerksamkeit, 126
 - räumliche Beziehung, 125
 - trisensorisch, 118
- multisensorische Interaktionen
 - $AV - (A + V)$, 50–52
 - ereigniskorrelierte Potentiale, 49, 67
 - $(T + TAV) - (TA + TV)$, 53
 - trisensorisch, 21, 33, 34
- preparation enhancement, 6, 15, 91–93, 123, 125, 128
- preparatory state model, 5
- race model, 21
- race model inequality, 7, 21
 - trisensorisch, 22, 25
- race model test, 7
 - Beispielgrafik, 8, 9
 - Modalitätswechsel, 40
 - Signifikanztest, 8, 27
- Reaktionskonflikt, 10, 16
- redundancy gain, 3
- redundant signals effect, 3
- redundant target effect, 3
- redundanter Reiz, 3
- Redundanzeffekt, 3
 - energy summation, 128, 130
 - Modalitätswechselkosten, 128
 - preparation enhancement, 128
 - statistical facilitation, 127
- Redundanzexperimente, 6
- response depression, 17, 67
- response enhancement, 17, 67
- räumliche Aufmerksamkeit, 97, 112, 126
 - evozierte Potentiale, 98

- visuell, 114, 115
- räumliche Beziehung, 12, 83, 84, 125
- räumlicher Kongruenzeffekt, 73, 85, 87, 92
 - Koaktivierung, 83, 84
 - Lateralisierung, 73, 75, 89, 94
- SOA, 13
- spatial rule, 17
- statistical facilitation, 6, 7, 21, 127
- stimulus onset asynchrony, 13
- Superposition
 - Simulation, 25
 - Superpositionsmodell, 14
- supramodale Merkmale, 3
- $(T + TAV) - (TA + TV)$, 53
- temporal rule, 17
- trisenensorische Interaktionen, 118
- trisenensorische Wechselwirkungen, 55
- visueller Reiz, 3
- Wahrnehmungsmodule, 99
- zeitliche Beziehung, 13

Danksagung

Ich möchte mich bei allen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, herzlich bedanken. An erster Stelle danke ich Prof. Dr. Brigitte Röder. Brigitte hat meine Arbeit in allen Phasen sehr engagiert betreut, hat das erste Paper (Kap. 4) wahrscheinlich fünf Mal von vorn bis hinten durchgelesen und akribisch korrigiert.

Herrn Prof. Frank Rösler danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens und für die vielen hilfreichen Ratschläge zur EEG-Methode, für die Unterstützung beim Erstellen der Manuskripte und für die Bereitstellung der technischen Infrastruktur.

Ganz herzlich bedanken möchte ich mich bei der Marburger Arbeitsgruppe kognitive Psychophysiologie, bei den anderen Doktoranden und Hiwis, ohne die meine Promotionszeit eine traurige Veranstaltung gewesen wäre, bei Kerstin Jost, bei Kathrin Lange, bei Kirsten Hötting, bei Anton Beer, bei Erwin Hennighausen, bei Christian Friedel und bei Gérard Bishop. Vielen Dank für die vielen technischen Hilfen, für die Hilfe bei den EEG-Untersuchungen und beim Schreiben und für die schöne Zeit in Marburg.

Außerdem möchte ich mich bei Herrn Prof. Mark Greenlee und der Arbeitsgruppe in Regensburg bedanken, die die letzte Phase der Promotionszeit selbstlos unterstützt und mir wertvolle Tips beim Abfassen des Textes gegeben haben.

Schließlich möchte ich mich noch herzlich bei Justine Rochon bedanken, die mich immer wieder motiviert hat, bei der Sache zu bleiben, die alles zimal korrigiert hat und die immer für mich da ist.

Erklärung

Ich versichere, dass ich meine Dissertation mit dem Titel „Multisensorische Integration von redundanten Reizen“ selbständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe angefertigt und mich dabei keiner anderen als der von mir ausdrücklich bezeichneten Quellen und Hilfen bedient habe.

Diese Dissertation wurde in der jetzigen oder ähnlichen Form noch bei keiner anderen Hochschule eingereicht und hat noch keinen sonstigen Prüfungszwecken gedient.

Marburg, 7. April 2005

Matthias Gondan